

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais  
PPGEM

PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DE DADOS AEROGEOFÍSICOS  
MAGNETOMÉTRICOS E GAMAESPECTROMÉTRICOS NO ESTUDO DO CONTROLE  
DAS MINERALIZAÇÕES AURÍFERAS NA REGIÃO DO COMPLEXO BOSSOROCA,  
SÃO SEPÉ, RS

*Márcio de Souza Soares*

Dissertação para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, RS  
2001

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais  
PPGEM

PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DE DADOS AEROGEOFÍSICOS  
MAGNETOMÉTRICOS E AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS NO ESTUDO DO  
CONTROLE DAS MINERALIZAÇÕES AURÍFERAS NA REGIÃO DO COMPLEXO  
BOSSOROCA, SÃO SEPÉ, RS

*Márcio de Souza Soares*

*Geólogo*

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral

Porto Alegre, RS

2001

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Jair Carlos Koppe

Banca Examinadora:

Prof. Dra. Silvia Beatriz Rolim – Departamento de Geodésia – Instituto de Geociências  
- UFRGS

Prof. Dr. Paulo Salvadorette – DEMIN - UFRGS

Prof. Dr. Telmo Fernando Perez de Quadros – DEMIN - UFRGS

Prof. Dr. Jair Carlos Koppe  
Coordenador do PPGEM

*"O primeiro consistia em jamais aceitar verdadeira coisa alguma que eu não conhecesse à evidência como tal, quer dizer, em evitar, cuidadosamente, a precipitação e a prevenção, incluindo apenas nos meus juízos aquilo que se mostrasse de modo tão claro e distinto a meu espírito que não subsistisse dúvida alguma.*

*O segundo consistia em dividir cada dificuldade a ser examinada em tantas partes quanto possível e necessário para resolvê-las.*

*O terceiro, pôr em ordem em meus pensamentos, começando pelos assuntos mais simples e mais fáceis de serem conhecidos, para atingir, paulatinamente, gradativamente, o conhecimento dos mais complexos, e supondo ainda uma ordem entre os que não se precedem normalmente uns aos outros.*

*E o último, fazer, para cada caso, enumerações tão exatas e revisões tão gerais que estivesse certo de não ter esquecido nada."*

René Descartes em "O Discurso sobre o Método", 1637.

Aos meus pais

Luiz Fernando de Oliveira Soares

Maria Aparecida de Souza Soares

## Agradecimentos

Ao professor Jair Carlos Koppe, que incentivou esse trabalho desde o princípio com sua valorosa amizade e ajuda com suas dicas, sugestões e apoio moral, indicando os problemas e apontando soluções.

Aos professores João Felipe Costa e Paulo Salvadoretti, a minha eterna admiração.

A todos colegas do Laboratório de Prospecção Mineral e Planejamento Mineiro, **sem exceção nenhuma**, pelas sugestões e observações valiosas e pelos momentos pelos quais convivemos juntos, nesses últimos dois anos.

Ao Governo Federal, através da Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de mestrado; CPRM (Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais) por ceder os dados para a realização dessa dissertação de mestrado e a UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul) pelos equipamentos, laboratórios, professores, técnicos-científicos e a todos funcionários dessa universidade que prestam serviços, à comunidade, gratuito e de qualidade.

A Geosoft América Latina, em nome de Bartira Carvalho, pelo apoio técnico ao uso correto do software Oasis Montaj - Geosoft® 4.3.

Aos meus familiares e amigos, velhos e novos, que me incentivam em continuar batalhando para fazer *ciência*, em especial, ao amigo e colega Miguel Carminatti, que me hospedou em sua casa, em São Paulo, durante um curso realizado na USP.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

# Sumário

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>XII</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XXI</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>XXIII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XXV</b>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 <i>Objetivos</i> .....	1
1.2 <i>Justificativa</i> .....	2
1.3 <i>Método de trabalho</i> .....	3
1.4 <i>Localização e vias de acesso</i> .....	6
1.5 <i>Aspectos fisiográficos e geomorfológicos</i> .....	6
1.6 <i>Características do levantamento aerogeofísico no Escudo Sul-rio-grandense</i> .....	8
1.7 <i>Levantamento aerogeofísico no Estado do Rio Grande do Sul</i> .....	10
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>11</b>
CONTEXTO GEOLÓGICO .....	11
2.1 <i>Introdução</i> .....	11
2.2 <i>Contexto geológico regional</i> .....	12
2.3 <i>Contexto geológico local</i> .....	12
2.3.1 <i>Seqüência Arroio Lajeado</i> .....	15
2.3.1.1 <i>Petrografia da Seqüência Arroio Lajeado</i> .....	15

2.3.1.1.1 Rochas ultramáficas .....	15
2.3.1.1.2 Rochas básicas .....	15
2.3.1.1.3 Rochas químicas.....	17
2.3.1.2 Geoquímica da Seqüência Arroio Lajeado .....	17
2.3.1.3 Metamorfismo .....	18
2.3.2 Seqüência Campestre.....	19
2.3.2.1 Petrografia da Seqüência Campestre.....	20
2.3.2.1.1 Rochas vulcanoclásticas.....	20
2.3.2.1.2 Rochas epiclásticas.....	21
2.3.2.1.3 Rochas sedimentares químicas.....	21
2.3.2.2 Metamorfismo da Seqüência Campestre.....	22
2.3.2.3 Geoquímica da Seqüência Campestre .....	23
2.3.3 Deformação do Complexo Bossoroca .....	26
2.3.3.1 Falhas transcorrentes .....	28
2.3.3.2 Cisalhamentos discretos .....	30
2.4 <i>Evolução geotectônica</i> .....	30
2.5 <i>Geocronologia</i> .....	34
2.6 <i>Características da mineralização de ouro no Complexo Bossoroca</i> .....	36
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>38</b>
TÉCNICAS GEOFÍSICAS APLICADAS .....	38
3.1. <i>Gamaespectrometria</i> .....	38
3.1.1. Radioatividade .....	39
3.1.2. Raios <i>Gama</i> .....	40
3.1.3. Decaimento radioativo.....	41
3.2. <i>Geoquímica dos radioelementos</i> .....	42
3.2.1. Potássio .....	42
3.2.2. Urânio ( $^{238}\text{U}$ ).....	43
3.2.3. Tório ( $^{232}\text{Th}$ ) .....	43
3.3. <i>Distribuição dos radioelementos nas rochas</i> .....	44
3.4. <i>Distribuição dos radioelementos nos solos</i> .....	45
3.5. <i>Efeito na distribuição dos radioelementos na exploração mineral</i> .....	48
3.6. <i>Aeromagnetometria</i> .....	50
3.6.1 Introdução .....	50
3.6.2 Campo geomagnético terrestre .....	50



3.6.3 Elementos do campo magnético da Terra.....	51
3.6.4 Campo magnético externo .....	51
3.6.5 Variação do campo principal .....	52
3.6.6 Magnetômetro .....	52
3.6.7 Anomalias magnéticas .....	53
3.6.8 Avaliação do aerolevanteamento.....	54
3.6.9 Correções nos levantamentos magnetométricos.....	55
3.6.10 Assinaturas magnéticas de feições geológicas.....	56
3.6.11 Exploração aeromagnética em modelos de depósitos minerais auríferos .....	58
3.6.11.1 Terrenos do tipo <i>greenstone belts</i> .....	58
3.6.11.2. A magnetita e o modelo de depósito mineral de ouro associado com vulcânicas .....	60
3.6.11.4. Modelo geofísico para Au do tipo <i>Homestake</i> .....	63
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>65</b>
PROCESSAMENTO DE DADOS AEROGEOFÍSICOS GAMAESPECTROMÉTRICOS E MAGNÉTICOS DA REGIÃO DO COMPLEXO BOSSOROCA .....	65
4.1 <i>Introdução</i> .....	65
4.2 <i>Critérios para o processamento</i> .....	65
4.3 <i>Geração de Malhas Regulares</i> .....	66
4.4 <i>Transformada Fourier em Dados Regularmente Espaçados</i> .....	67
4.5 <i>Interpolação</i> .....	69
4.6 <i>Mapas de Contorno</i> .....	70
4.7 <i>Frequência Máxima</i> .....	70
4.8 Remoção do campo magnético regional da Terra.....	71
4.9 Espectro de potência .....	73
4.10 Micronivelamento .....	75
4.10.1 Aplicação dos Filtros nos Mapas Aeromagnéticos.....	79
4.10.2 Continuação para cima ( <i>Upward Continuation</i> ).....	79
4.10.3 Primeira e Segunda Derivada Vertical.....	80
4.10.4 Redução ao pólo.....	81
4.10.5 Sinal analítico .....	84
4.10.6 Integração Vertical.....	85
4.10.7 Gradiente Horizontal.....	87

4.10.8	Realce através de mapa de contorno.....	89
4.10.9	Realce por sombreamento e tons de cinza .....	92
4.11	<i>Processamento de dados aeroaerogamaespectrométricos</i> .....	95
4.11.1	Micronivelamento .....	95
4.11.2	Mapas dos canais de contagem total, potássio, equivalente tório e equivalente urânio.....	97
4.11.3	Contagem total.....	97
4.11.4	Potássio .....	101
4.11.5	Equivalente tório.....	103
4.11.6	Equivalente urânio .....	107
4.11.7	Mapas de razões $eTh/K$ , $eU/eTh$ e $eU/K$ .....	109
4.11.8	Mapas ternários.....	112
4.11.9	Potássio Anômalo e Urânio Anômalo .....	114
4.11.10	Potássio anômalo e urânio anômalo para dados regionais.....	115
4.11.11	Parâmetro $F$ .....	117
<b>CAPÍTULO 5.....</b>		<b>119</b>
INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROMAGNÉTICOS E AEROAEROGAMAESPECTROMÉTRICOS		
.....		119
5.1	<i>Interpretação dos Dados Aeroaerogamaespectrométricos</i> .....	119
5.1.1	Análise Qualitativa .....	119
5.1.2	Imagens Ternárias.....	120
5.2	<i>Interpretação dos Mapas Contagem Total, K, eTh, eU</i> .....	124
5.2.1	Contagem Total.....	124
5.2.2	Potássio .....	125
5.2.3	Equivalente Tório .....	127
5.2.4	Equivalente Urânio .....	128
5.3	<i>Interpretação das imagens de razões <math>eU/K</math>, <math>eU/eTh</math> e <math>eTh/K</math></i> .....	130
5.3.1	$eTh/K$ .....	130
5.3.2	Razão $eU/Th$ .....	132
5.3.3	Razão $eU/K$ .....	134
5.4	<i>Interpretação dos dados aerogamaespectrométricos</i> .....	135
5.4.1	Interpretação das imagens de potássio e urânio anômalos .....	135
5.4.2	Parâmetro $F$ .....	137
5.5	<i>Interpretação dos dados aeromagnéticos</i> .....	139

5.5.1 Campo magnético anômalo .....	139
5.5.2 Primeira e segunda derivadas verticais .....	141
5.5.3 Gradiente horizontal .....	143
5.5.4 Continuação para cima.....	145
5.5.5 Sinal analítico .....	147
<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>151</b>
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	151
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>154</b>

## Lista de Figuras

- Figura 1.1. Fluxograma das etapas de trabalho utilizado no desenvolvimento dessa dissertação. .... 6
- Figura 1.2. Mapa de localização (área destacada no mapa) e vias de acesso à região do Complexo Bossoroca, (<http://www.caiuaficha.com.br>). .... 7
- Figura 2.1. Posicionamento geotectônico da região do Complexo Bossoroca (quadrado), modificado de Roldão, 2000, (a) Província Mantiqueira (Hasui, 1984) (b) unidades geotectônicas da Plataforma Sul-Americana e (c) posicionamento da área de trabalho no Escudo Sul-rio-grandense. .... 13
- Figura 2.2. Mapa geológico da região do Complexo Bossoroca, modificado da Carta de Cachoeira do Sul (CPRM, 2000). .... 14
- Figura 2.3. Diagrama de Jensen ; Pike (1976), para as rochas da Seqüência Arroio Lajeado, modificado de Koppe (1990). .... 18
- Figura 2.4. Diagrama ternário de Irvine e Barragar, 1971 (a) e diagrama de Jensen ; Pike, 1976 (b) para as rochas da Seqüência Campestre, modificado de Koppe (1990). 26
- Figura 2.5. Mapa do processo evolutivo do Escudo Sul-rio-grandense, segundo Chemale Jr. (2000), onde o Complexo Bossoroca encontra-se vinculada ao Cinturão Vila Nova, a) fragmentação das placas Rio de La Plata e Kalahari (FASE I); b) processo de rifteamento da placa Kalahari com formação de uma margem ativa convergente a oeste e divergente ao leste (FASE II); c) geração do protoceano Adamastor, que entrou em processo de subducção em menos de 100 Ma (FASE III) e d) subducção do protoceano Adamastor com magmatismo tardi a pós – orogênico posterior (FASE IV). .... 33

Figura 1.3. Mapa de localização das principais ocorrências auríferas da região do Complexo Bossoroca.....	36
Figura 3.1. Poder de penetração das partículas radioativas ( <a href="http://www.ipen.br/n/nr/nr_portugues/pag07.htm">http://www.ipen.br/n/nr/nr_portugues/pag07.htm</a> ). .....	39
Figura 3.2. Variação na média do conteúdo de K, eTh, eU para rochas ígneas intrusivas e extrusivas com aumento no conteúdo de sílica. Modificado de Dickson ; Scott (1997).....	45
Figura 3.3. Variação no conteúdo das concentrações de K, U e Th durante o intemperismo do basalto, modificado de Dickson ; Scott (1997).....	47
Figura 3.4. Sumário dos teores (na ordem) de K, eU e eTh dentro e ao redor da mina de ouro em Bimurra, na Austrália, modificado de Dickson ; Scott (1997). .....	49
Figura 3.5. Anomalias de feições geológicas. A) falhamentos em rochas recobertas. O deslocamento abrupto do contorno magnético é indicativo de uma falha. B) uma área de relevo com baixo magnético com o sentido da direção vagamente definido. Isto é típico de expressão magnética de um terreno granítico ou gnáissico. Se este padrão for intensificado, poderia facilmente representar uma assinatura do tipo Greenstone. C) peridotito serpentizado, plano e perfil D) mostrando o campo magnético sobre um <i>sill</i> peridotítico serpentizado em Newfoundland, Canadá. Modificado de Camille ; Potvin, 1998.....	57
Figura 4.1. Ao longo das linhas das amostras, através das linhas de vôo e o <i>malha regular</i> de corte na frequência de Nyquist assumindo uma pesquisa com 200 metros de espaçamento de linhas de vôo. Dez metros entre as amostras e 50 metros o tamanho do <i>malha regular</i> . Alta amostragem ao longo das linhas entre amostras e baixa amostragem entre as linhas de vôo (Linha de Nyquist), modificado de Billings ; Richards (2000).....	68
Figura 4.2. Espectro de potência radial médio do campo anômalo para a região do Complexo Bossoroca e sua profundidade estimada, onde (1) são fontes profundas ou intracrustais com 1,5 km de profundidade, (2) fontes intermediárias ou superficiais com 825 metros de profundidade e (3) Frequência de Nyquist. ....	75
Figura 4.3. Mapa do Campo magnético total da região do Complexo Bossoroca. ....	77
Figura 4.4. Imagem do campo magnético anômalo e suas principais características de realce. ....	78
Figura 4.5. Imagem da continuação para cima (1000 metros) do campo magnético anômalo.	80

Figura 4.6. Imagem da primeira derivada vertical campo magnético anômalo e suas principais características de realce. ....	83
Figura 4.7. Imagem da segunda derivada vertical reduzida ao pólo do campo magnético anômalo e suas principais características de realce. ....	84
Figura 4.8. Imagem em pseudocoloração do sinal analítico do campo magnético anômalo. ...	86
Figura 4.9. Imagem em pseudocoloração da integral vertical do campo magnético anômalo.	87
Figura 4.10. Gradiente horizontal na direção N-S do campo magnético anômalo.....	88
Figura 4.11. Gradiente horizontal na direção E-W do campo magnético anômalo.....	89
Figura 4.12. Mapa de contorno do campo magnético anômalo.....	90
Figura 4.13. Mapa de contorno da segunda derivada vertical do campo magnético anômalo.	91
Figura 4.14. Mapa de contorno a integral vertical do campo magnético anômalo.....	92
Figura 4.16. Imagem do campo magnético anômalo em tons de cinza e suas principais características de realce. ....	93
Figura 4.17. Imagem do gradiente horizontal na direção N-S do campo magnético anômalo em tons de cinza e suas principais características de realce. ....	94
Figura 4.18. Espectro de potência 2D dos mapas de contagem total (a), potássio (b), tório (c) e urânio (d) da região do Complexo Bossoroca. ....	96
Figura 4.19. Mapa de contorno de contagem total da região do Complexo Bossoroca. ....	98
Figura 4.20. Imagem em pseudocoloração de contagem total e suas principais características de realce. ....	99
Figura 4.21. Imagem em tons de cinza de contagem total da região do Complexo Bossoroca. ....	100
Figura 4.22. Mapa de contorno do canal de potássio. ....	101
Figura 4.23. Imagem em pseudocoloração do canal de potássio e suas principais características de realce. ....	102
Figura 4.24. Imagem em tons de cinza do canal de potássio e suas principais características de realce.....	103
Figura 4.25. Mapa de contorno de eTh.....	104
Figura 4.26. Imagem em pseudocoloração no canal de eTh e suas principais características de realce.....	105
Figura 4.27. Imagem em tons de cinza do canal de eTh e suas principais características de realce.....	106
Figura 4.28. Mapa de contorno do canal de eU.....	107

Figura 4.29. Imagem em pseudocoloração do canal de eU e suas principais características de realce.....	108
Figura 4.30. Imagem em tons de cinza do canal de eU e suas principais características de realce.....	109
Figura 4.31. Imagem em pseudocoloração da razão eTh/K. Características de realce idem Figura 4.20.....	110
Figura 4.32. Imagem em pseudocoloração da razão eU/eTh e suas principais características de realce.....	111
Figura 4.33. Imagem em pseudocoloração da razão eU/K e suas principais características de realce.....	112
Figura 4.34. Imagem ternária dos canais de potássio, urânio e tório no padrão RGB (K-eTh-eU). .....	113
Figura 4.35. Imagem ternária dos canais de potássio, urânio e tório no padrão CMY (K-eTh-eU). .....	114
Figura 4.36. Relação Urânio x Tório e Potássio x Tório para os dados da região do Complexo Bossoroca.....	116
Figura 4.37. Imagem do potássio anômalo da região do Complexo Bossoroca.....	117
Figura 4.38. Imagem do urânio anômalo da região do Complexo Bossoroca.....	117
Figura 4.39. Mapa do parâmetro $F$ para região do Complexo Bossoroca.....	118
Complexo Bossoroca.....	121
Figura 5.1. Mapa de interpretação geológica obtida a partir dos dados aerogeofísicos aerogamaespectrométricos. Os domínios são os mesmos apresentados na Tabela 5.4. ....	123
Figura 5.2. Mapa dos principais lineamentos do canal de contagem total da região do Complexo Bossoroca, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Sequência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná. ....	125
Figura 5.3. Mapa de lineamentos obtidos através do canal de potássio da região do Complexo Bossoroca, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Sequência Arroio	

Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná..... 126

Figura 5.4. Mapa dos principais lineamentos do canal de equivalente tório da região do Complexo Bossoroca, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Sequência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná..... 128

Figura 5.5. Mapa de lineamentos do canal de equivalente urânio da região do Complexo Bossoroca, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Sequência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná..... 129

Figura 5.6. Mapa da razão  $eTh/K$  associado ao mapa geológico interpretativo extraído dos dados aeroaerogamaespectrométricos da região do Complexo Bossoroca, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Sequência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná..... 131

Figura 5.7. Mapa interpretativo da imagem da razão  $eTh/K$  associado ao mapa geológico interpretativo extraído dos dados aeroaerogamaespectrométricos da região do Complexo Bossoroca, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2



Seqüência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná. .... 132

Figura 5.8. Mapa da razão  $eU/eTh$  associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Seqüência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná. .... 133

Figura 5.9. Mapa da razão  $eU/K$  associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Seqüência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná. .... 134

Figura 5.10. Mapa de potássio anômalo da região do Complexo Bossoroca, indicando os locais para se encontrar potássio hidrotermal, mostrado pelos valores mais altos associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Seqüência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná. .... 136

Figura 5.11. Mapa de urânio anômalo da região do Complexo Bossoroca, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Seqüência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10

Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná.... 137

Figura 5.12. Mapa do Parâmetro  $F$  da região do Complexo Bossoroca, mostrando que as ocorrências auríferas se encontram no limite entre variações anômalas baixas e altas, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Sequência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná. .... 138

Figura 5.13. Mapa dos principais lineamentos do campo magnético anômalo da região do Complexo Bossoroca, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Sequência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná. .... 140

Figura 5.14. Mapa dos principais lineamentos da imagem de primeira derivada vertical do campo magnético anômalo da região do Complexo Bossoroca, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Sequência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná.... 142

Figura 5.15. Mapa dos principais lineamentos da imagem da segunda derivada vertical do campo magnético anômalo da região do Complexo Bossoroca, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Sequência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10

Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná.... 143

Figura 5.16. Mapa com relevo sombreado a 45° pseudocolorido em tons de cinza do gradiente horizontal na direção N-S, extraído derivada horizontal “y” da região do Complexo Bossoroca, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Seqüência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná. .... 144

Figura 5.17. Mapa dos principais lineamentos extraídos da imagem anterior, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Seqüência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná.... 145

Figura 5.18. Mapa dos principais lineamentos extraídos da imagem continuação para cima (1000 metros) do campo magnético anômalo da região do Complexo Bossoroca, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Seqüência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná. .... 146

Figura 5.19. Mapa de amplitude do sinal analítico do campo magnético anômalo da região do Complexo Bossoroca, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Seqüência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e

vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná. .... 148

Figura 5.20. Mapa dos principais lineamentos extraídos da imagem anterior, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Sequência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná. .... 148

Figura 5.21. Mapa qualitativo e interpretativo dos principais lineamentos superficiais magnetométricos da região do Complexo Bossoroca, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Sequência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná. .... 149

Figura 5.22. Mapa qualitativo e interpretativo dos principais lineamentos aerogamaespectrométricos da região do Complexo Bossoroca, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Sequência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná. .... 150

## Lista de Tabelas

Tabela 1.1. Sumário das principais feições físicas na pesquisa de ouro em modelos epitermais, utilizando-se métodos geofísicos como gamaespectrometria e magnetometria, modificado de Irvine ; Smith (1990). .....	3
Tabela 1.2. Relação de custos relacionada a uma pesquisa de exploração de óleo e gás natural. Modificado de Kuuskraa <i>et al.</i> (1996). .....	3
Tabela 1.3. (a) e (b). As principais ocorrências auríferas da região do Complexo Bossoroca e suas características como (a) possança, extensão, atitude e as principais litologias e (b) reserva e teor médio. ....	37
Tabela 1.4. Características contratuais do aerolevanteamento no Escudo Sul-rio-grandense. ....	8
Tabela 1.5. Características do aerolevanteamento realizado na região do Escudo Sul-rio-grandense. ....	9
Tabela 2.1. Análise química dos anfibólios das rochas metamórficas básicas da Seqüência Arroio Lajeado, modificado de Zarpelon (1986). .....	16
Tabela 2.2. Análise química (% em peso), média de três determinações, em biotitas das rochas metamórficas da Seqüência Campestre, na Mina Bossoroca, modificado de Koppe (1990). .....	24
Tabela 2.3. Análise química (% em peso), em anfibólios em meta-dioritos da Mina Cerrito do Ouro, na Seqüência Campestre, modificado de Viter (1997). .....	24
Tabela 2.4. Composição média de óxidos (% em peso) de andesitos basaltos da Seqüência Campestre, modificado de Koppe (1990). .....	25

Tabela 2.5. Principais fases de deformação relacionadas ao Complexo Bossoroça, extraído de Zarpelon (1986). Os quadros em branco indicam feições não mapeadas ou não encontradas. ....	29
Tabela 2.6 Geocronologia para as rochas do Complexo Bossoroça e litologias associadas. ....	35
Tabela 3.1. Tabela ressaltando as principais características das partículas <i>alfa</i> e <i>beta</i> . ....	40
Tabela 3.2. Principais características dos raios gama. ....	41
Tabela 3.3. Conteúdo dos radioelementos em rochas e solos de intrusivas e extrusivas australianas, modificado de Dickson ; Scott (1997). ....	47
Tabela 4.1. Pontos referentes à área de pesquisa para a correção do IGRF. ....	72
Inclinação 100	
Tabela 5.1. Zonas radiométricas (cp2s) na região do Complexo Bossoroça. ....	120
Tabela 5.2. Estatística básica para os dados radiométricos da região do Complexo Bossoroça. ....	121
Tabela 5.3. Características radiométricas para interpretação qualitativa dos dados aeroaerogamaespectrométricos. ....	121
Tabela 5.4. Principais unidades litoestratigráficas da região do Complexo Bossoroça e suas principais domínios. ....	122

## Resumo

Sete ocorrências auríferas estão inseridas na Seqüência Campestre do Complexo Bossoroca, no Escudo Sul-rio-grandense, municípios de São Sepé, no Estado do Rio Grande do Sul. Nessa região, foi realizado um aerolevante geofísico no qual foram coletados dados magnetométricos e aerogamaespectrométricos (K, U, Th e contagem total), em convênio firmado entre órgãos federais brasileiros (CPRM, DNPM e CNEN) e a empresa canadense Texas Instruments no período 1972-1973.

Nessa dissertação são apresentados as interpretações e resultados dos dados e a metodologia utilizada para a interpretação das principais estruturas magnéticas e radiométricas visando aplicação na exploração mineral de ouro. Esse tipo de processamento, correlacionado aos dados geológicos, é uma prática usual de campanhas de prospecção mineral desde 1940 e é considerada como uma ferramenta de grande potencial para esse propósito.

O processamento de dados magnetométricos forneceu mapas de primeira e segunda derivadas verticais, sinal analítico, gradiente horizontal, integral vertical, continuação para cima (1000, 2000 e 3000 metros) e seus principais lineamentos do campo magnético residual. Os dados foram tratados e posteriormente transformados em mapas de contorno e imagens pseudocoloridos e em tons de cinza com relevo sombreado (iluminação N, NE e SE) para realçar os principais lineamentos.

Os mapas produzidos a partir dos dados aerogamaespectrométricos foram os de contagem total, K, U e Th, suas razões Th/K, U/K e U/Th; mapas ternários nos padrões RGB e CMY, potássio e urânio anômalos e parâmetro  $F$ , também foram transformados em mapas de contorno, pseudocoloridos e tons de cinza com relevo sombreado (iluminação a N, NE e SE) e um mapa geológico interpretativo da região do Complexo Bossoroca.

As imagens magnetométricas mostraram-se importantes na caracterização estrutural regional, possibilitando a identificação de lineamentos NE-SW e NW-SE, não mapeados anteriormente e que podem estar relacionadas diretamente às ocorrências auríferas da região do Complexo Bossoroca. A aplicação das técnicas de processamento e interpretação de estruturas magnéticas por meio dos filtros como gradiente horizontal, primeira e segunda derivada, sinal analítico, continuação para cima, possibilitaram a determinação de descontinuidades físicas que podem ser traduzidas em estruturas geológicas.

O processamento de dados aerogamaespectrométricos possibilitou a caracterização de unidades geológicas regionais, a identificação de possíveis *trends* e zonas anômalas em potássio, relacionadas com as principais ocorrências auríferas da região. As imagens ternárias nos padrões RGB e CMY permitiram a distinção e a caracterização das grandes unidades geológicas. Pode-se individualizar três regiões principais dentro da Seqüência Campestre, não mapeadas anteriormente, onde se encontram as ocorrências auríferas.



## Abstract

Seven gold occurrences are located in the Campestre Sequence in the Bossoroca Complex, Sul-rio-grandense Shield at the São Sepé county, State of Rio Grande do Sul. In this region, was developed an aerogeophysical survey in which were recorded magnetic and gamma-spectrometric (K, U, Th and total count) data. This survey was performed by the Federal Brazilian Organizations (CPRM, DNPM and CNEN) and the Canadian firm Texas Instruments, during the period 1972-1973.

This presents the results and the analysis and interpretation of the methodology used to interpret the principal magnetic and gamma-spectrometric structures applied in gold mineral exploration. These kind of processing, correlated to geologic data, became a field practice in the mineral exploration survey since sixty years ago and is considered a potential tool to achieved goal.

Magnetic data was interpolated into a regular malha regulars by using minimum curvature algorithm. The malha regulars were microlevelled to reduce noise due to mislevelling stiles present in the data. The processing provided first and second vertical derivative, analytic signal, horizontal gradient, vertical integral, upward continuation (1000, 2000, 3000 meters) maps. The interpretation of these images produced maps of the magnetic structures (principal lineaments). Some these lineaments,

Gamma-spectrometric maps provide informations regarding of the geology and possible targets to the future explorations. Through the interpretative geological map, was possible to outline largest geology units with the different radiometric response and subdivide the Campestre Sequence into three distinct units, which are not found in the last principal geological maps of the region.

The magnetometric images were important to highlight the regional structures characterization, and the possibility of the identification the NW-SE and NE-SW lineaments, does not mapped early, in the Bossoroca Complex region. The applications these processing techniques and interpretation of magnetic structures with the horizontal gradient, first and second vertical derivatives, analytic signal and upward continuation images, made possible the definitio of physical discontinuities that represent geological structures structures.

The gammaspectrometric data processing allowed the characterization of regional geological units, the identification of possible trends and Potassium anomaly zone related with de main Bossoroca Complex gold ocurrences. The ternary images in the RGB and CMY patterns provided the characterization of the largest geological units. Three principal units was individualized at the Campestre Sequence, does not mapped previously. Prospective guides were considered in this region by the gammaspectrometric and magnetometric processing data.

# Capítulo 1

## Introdução

Nesse capítulo, apresenta-se o principal objetivo desse trabalho, suas justificativas e a metodologia aplicada no desenvolvimento da dissertação. São incluídas, a localização e as principais vias de acesso à área de estudo e é discutida, a situação e as características das ocorrências auríferas da região do Complexo Bossoroca e os aerolevantamentos geofísicos no Escudo Sul-rio-grandense, bem como os principais trabalhos feitos com esse banco de dados.

### 1.1 Objetivos

Esse trabalho tem por objetivo principal a avaliação de técnicas de processamento e interpretação de dados aerogeofísicos aerogamaespectrométricos e magnetométricos para utilização na prospecção de ouro, na região do Complexo Bossoroca. O principal objetivo desses mapas, nesse trabalho, é produzir informações à cerca da geologia e das estruturas que possam ser mapeadas, bem como qualificar e quantificar o Complexo Bossoroca em possíveis áreas de alteração hidrotermal. Com base nos dados disponíveis e na introdução de informações a respeito da geologia regional e local relacionada direta ou indiretamente com as ocorrências auríferas, buscou-se desvendar os principais controles dos depósitos auríferos, visando a definição de critérios prospectivos para a exploração mineral regional. Secundariamente, obter informações para melhorar o entedimento geológico local e regional.

## 1.2 Justificativa

Apesar de diversos trabalhos já terem sido realizados na região do Complexo Bossoroca, inúmeros aspectos ainda restam para serem conhecidos, entre eles destaca-se:

- De acordo com Koppe (1990) e Viter (1997) há a necessidade de realizar estudos geofísicos para estimativa da espessura e comportamento das seqüências e principais estruturas regionais e locais. Dentre as ferramentas que salientam feições estruturais, encontra-se a aeromagnetometria que com auxílio da aerogamaespectrometria, ajuda a determinar como se comporta a geologia de uma região (Tabela 1.1). A definição do papel das estruturas em relação ao posicionamento dos depósitos auríferos é essencial para a compreensão de sua gênese, o que favorece o estabelecimento de futuros trabalhos prospectivos;
- Existem poucos trabalhos geofísicos relacionados diretamente à prospecção aerogeofísica voltados especificamente para a prospecção mineral aurífera no Estado do Rio Grande do Sul (ver tópico 1.1.8). Novos estudos contribuem, portanto, para melhorar o conhecimento do controle dos depósitos introduzindo novos alvos para exploração;
- Do ponto de vista econômico, num trabalho de prospecção, voltado para um bem mineral qualquer, os trabalhos geofísicos correspondem a cerca de 5 - 20% no total de uma campanha de prospecção. Se levarmos em consideração apenas o aerolevanteamento, esse percentual pode se reduzir para 2% do total de um trabalho prospectivo (Tabela 1.2). De acordo com Billings ; Richards (2000) a aerogeofísica, particularmente o aeromagnetismo tem sido a base da indústria na exploração mineral nos últimos cinquenta anos e um componente significativo nos projetos da empresa Rio Tinto na geração e seleção de áreas. Em 1997, a Rio Tinto da Austrália gastou, em investimentos, aproximadamente 10% de sua exploração em geofísica, dos quais 2/3 em pesquisa aérea (~4% em magnéticos e ~2% em eletromagnéticos. No Brasil, esses trabalhos ainda são muito restritos, o que justifica o estudo de levantamentos geofísicos existentes.

Tabela 1.1. Sumário das principais feições físicas na pesquisa de ouro em modelos epitermais, utilizando-se métodos geofísicos como gamaespectrometria e magnetometria, modificado de Irvine ; Smith (1990).

<b>Feições físicas</b>	<b>Enfoque geofísico</b>
Realce no conteúdo de Potássio	Pesquisa gamaespectrométrica aérea e de superfície
Estruturas principais	Pesquisa aeromagnetométrica, gravimétrica e magnetotelúrica
Intrusivas profundas	Aeromagnetométrica, gravimétrica e magnetotelúrica

Tabela 1.2. Relação de custos relacionada a uma pesquisa de exploração de óleo e gás natural. Modificado de Kuuskraa *et al.* (1996).

<b>Escala</b>	<b>Pesquisa</b>	<b>Custos (% em \$)</b>
Regional	Sensoriamento Remoto e Análise Geológica	1%
Prospecto/Trends	Pesquisa Magnética de Alta Resolução	2%
Alvo de exploração	Sísmica 3D	20%
Furos de sonda	Poços (7)	77%

### 1.3 Método de trabalho

Os trabalhos dessa pesquisa iniciaram com a análise do banco de dados do Programa de Levantamentos Geológicos Básicos cedidos pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e com um levantamento bibliográfico sobre a geologia da região do Complexo Bossoroca, dos métodos de processamento e interpretação dos dados aerogeofísicos magnetométricos e aerogamaespectrométricos, seus principais filtros e os algoritmos utilizados na exploração mineral. Foi efetivada intensa revisão bibliográfica dos principais modelos de depósitos minerais auríferos, da aplicação das técnicas de processamento e interpretação aerogeofísica magnética e gamaespectrométrica nesses principais modelos geológicos e dos principais fundamentos teóricos magnéticos e radiométricos.

Após essa etapa aplicou-se as metodologias de pré-processamento, processamento e pós-processamento dos dados com o objetivo de interpretá-los e correlacioná-los com a

geologia da área estudada. Os programas computacionais utilizados para esse trabalho foram o Oasis Montaj Geosoft<sup>®</sup> 4.3 para o tratamento de dados aerogeofísicos (processamento, interpretação e análise estatística), o Grafer<sup>®</sup> 2.0, para produção e edição dos gráficos, Corel Draw<sup>®</sup> 9.0 e Autocad<sup>®</sup> 2000 para edição das Figuras.

Foram feitas pesquisas no âmbito geofísico aplicado à prospecção mineral das técnicas aerogamaespectrométricas e aeromagnetométricas e suas principais relações com a exploração mineral aurífera. Dentro dessa revisão, foram pesquisados os principais métodos de:

- Pré-processamento, com o levantamento dos principais algoritmos de filtragem, com o objetivo de separar as principais frequências de corte, tanto nos dados magnetométricos quanto nos dados radiométricos;
- Processamento, com ênfase da pesquisa de modo a obter a melhor resolução, em malhas regulares, e a melhor forma de apresentação das principais imagens por meio de mapas de contorno, imagens com relevo sombreado pseudocoloridos e tons de cinza;
- A interpretação consistiu na caracterização dos principais lineamentos com as ferramentas de filtragem auxiliar disponíveis no programa computacional de trabalho dos dados aerogeofísicos.

Igualmente efetivou-se levantamento dos dados geológicos da região do Complexo Bossoroca. O levantamento consistiu na caracterização geoquímica, petrográfica, geocronológica e estrutural, no âmbito metamórfico e deformacional, a fim de correlacionar com os dados aerogeofísicos obtidos (Figura 1.1). Preparou-se um mapa geológico, na escala 1:250.000, destacando as principais bacias hidrográficas e as principais estruturas, com o objetivo de comparar com as imagens aerogeofísicas obtidas durante esse trabalho.

Na seqüência, foram efetivadas as devidas interpretações, buscando-se definições de critérios prospectivos, elucidando aspectos geológicos locais e regionais e estabelecimento de contatos sobre os depósitos auríferos existentes.

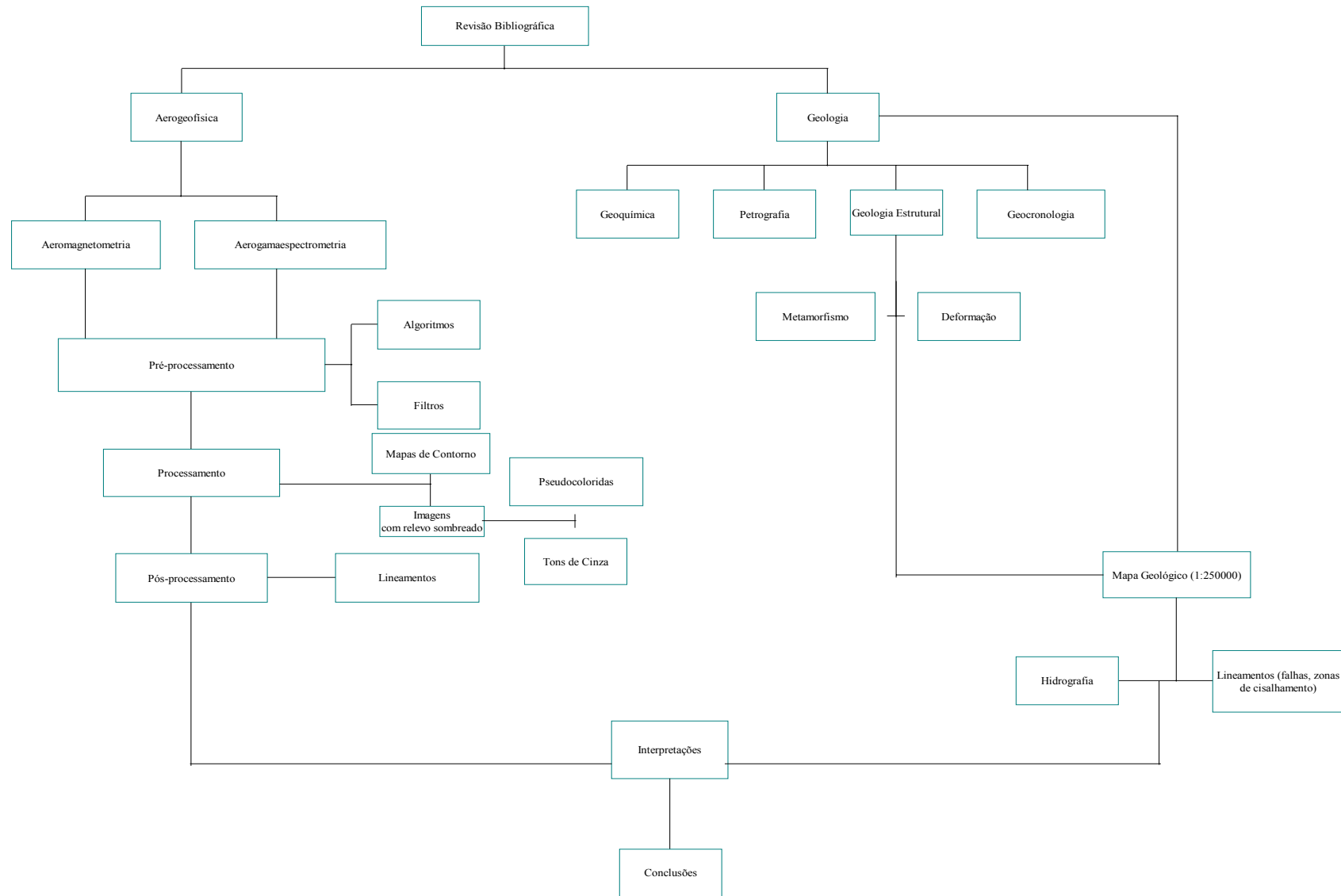


Figura 1.1. Fluxograma das etapas de trabalho utilizado no desenvolvimento dessa dissertação.

## **1.4 Localização e vias de acesso**

O Complexo Bossoroca está localizado no Município de São Sepé, na região sudeste do Estado do Rio Grande do Sul, no extremo sul do Brasil, aproximadamente 260 km de Porto Alegre e situa-se entre os Municípios de São Gabriel, Vila Nova do Sul e Caçapava do Sul (Figura 1.2). A região é de fácil acesso, pois a BR-290 corta a área no sentido E-W. Duas estradas federais encontram-se próxima à área de estudo, a BR-153 próxima à cidade de Caçapava do Sul e a Br-392 próxima à cidade de São Sepé.

A região foi delimitada de acordo com o banco de dados aerogeofísicos com objetivo de disponibilizar as sete ocorrências auríferas do Complexo Bossoroca. Foi delimitada uma região de 25 x 25 km entre as coordenadas UTM 225000 e 250000 Leste e 6625000 e 6650000 Norte.

## **1.5 Aspectos fisiográficos e geomorfológicos**

A área de estudo insere-se na unidade geomorfológica denominada de Escudo Sul-riograndense, na região sudeste do Estado. A região, com altitude média de 170 metros acima do nível do mar, é formada por coxilhas, entrecortadas por cristas alongadas, por sua vez constituídas por veios de quartzo, metacherts e diques de rochas de composição ácida e intermediária. As coxilhas apresentam formas arredondadas com declives suaves (Koppe, 1990). Os fatores que controlam a geomorfologia da região são litologias, falhamentos e intemperismo, os quais, definiram o relevo da região.

A região possui um clima temperado, onde a temperatura média é de 17°C, com uma amplitude térmica entre verão e inverno de aproximadamente 10°C. A temperatura média no inverno é próxima aos 15°C, podendo ser inferior aos 10°C entre julho e agosto. No verão, a temperatura média é superior aos 22°C.

O município de São Sepé tem como base de sua economia a pecuária e agricultura. Porém, possui em seu subsolo, as mais variadas riquezas tais como o ouro, ferro, amianto, grafita, talco e carvão. Essas permanecem ainda praticamente inexploradas.



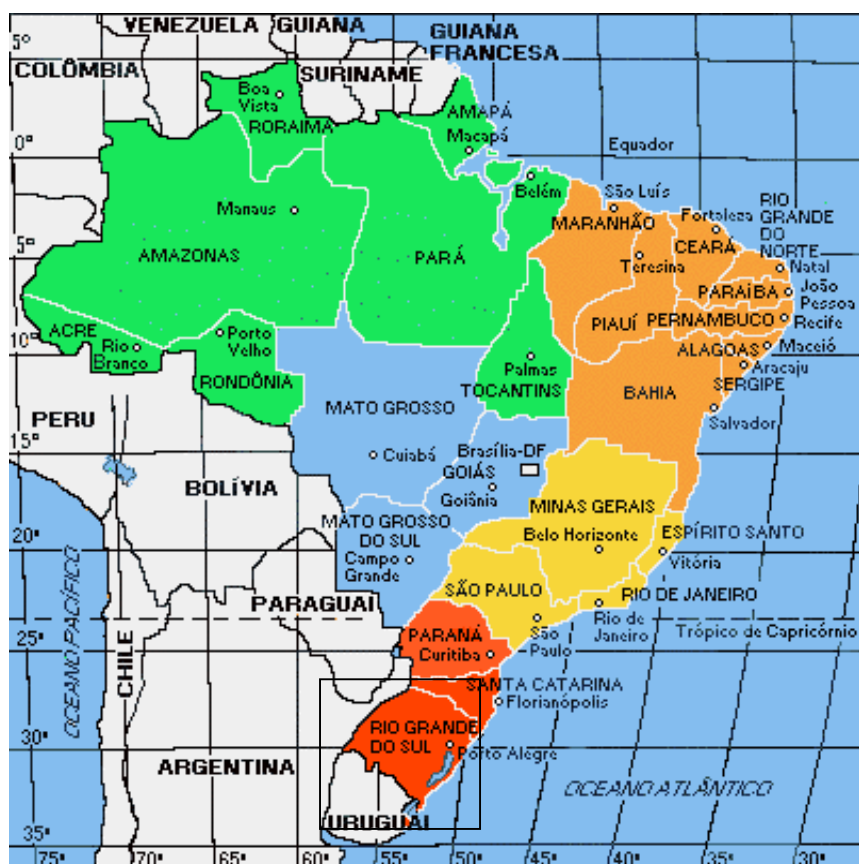


Figura 1.2. Mapa de localização (área destacada no mapa) e vias de acesso à região do Complexo Bossoroca, (<http://www.caiuaficha.com.br>).

## 1.6 Características do levantamento aerogeofísico no Escudo Sul-riograndense

Os dados utilizados nesta pesquisa são oriundos do Projeto Camaquã Área I (Jackson *et al.*, 1973), realizado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), e pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) em convênio com a Texas Instruments Inc. As Tabelas 1.4 e 1.5 sumarizam as principais características do aerolevanteamento.

Para o levantamento aerogeofísico aerogamaespectrométrico devemos salientar que o volume total dos cristais detectores de iodeto de sódio ativado a tálio (cristais *down*) foi de 2.491,59 polegadas cúbicas, sendo utilizado o aerogamaespectrômetro fabricado pela Texas Instruments, o qual não foi informado o modelo. Para o levantamento aeromagnético, foi utilizado o aeromagnetômetro de prótons, modelo *G-803* da *GEOMETRICS*, não sendo informada a disposição da montagem do sensor em relação à aeronave *Douglas DC-3*.

Tabela 1.4. Características contratuais do aerolevanteamento no Escudo Sul-riograndense.

Identificação	1010
Contratante	Departamento Nacional da Produção Mineral - DNPM /CNEN
Contratado	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM
Solicitação	DNPM/DGM/CPRM 184/72
Ano do levantamento	1972
Objetivo	Levant./process./interpr. de dados mag. e radiométricos

Tabela 1.5. Características do aerolevantamento realizado na região do Escudo Sul-rio-grandense.

Métodos	Magnetometria e Gamaespectrometria
Contratante	CPRM
Contratado	Texas Instruments
Contrato do período	06 a 05/73
Número de áreas	01
Total de Perfis	36.763 km
Intervalo (amostragem)	1s
Altura de Vôo	150 m
Área total	33.906 km <sup>2</sup>
Direção das linhas de vôo	NW-SE
Espaçamento das linhas de vôo	1 km
Direção das linhas de controle	NE-SW
Espaçamento das linhas de controle	18 km
Tempo de Integração Gama	2 s
Produtos	Registros analógicos; filmes de rastreio; fotomosaicos com posicionamento dos perfis; fitas magnéticas de campo.

O nivelamento (Jackson *et al.* 1973, apud Roldão, 2000) envolveu os seguintes processos: (a) a calibração do canal de energia; (b) a correção por redução da matriz ao espectro padrão dos canais de tório e urânio em White Mountains e na Mina de Haystack, respectivamente; (c) a normalização do tempo ativo (cp2s); (d) a correção da radiação cósmica; (e) a correção da radiação do *background*; (f) a correção da altura e (g) a correção da radiação atmosférica. Nos dados magnéticos foram eliminados erros sistemáticos, tais como: efeitos iniciais, efeitos diurnos, deriva dos instrumentos, etc.

## 1.7 Levantamento aerogeofísico no Estado do Rio Grande do Sul

Entre os trabalhos realizados com dados de levantamentos aerogeofísicos no estado do Rio Grande do Sul, destacam-se quatro trabalhos: Costa (1997), Orlandi Filho *et al.* (1990), Porcher *et al.* (1995) e Roldão (2000). Assim como esse trabalho, todos eles utilizaram os dados aerolevantados no ano de 1973.

Costa (1997) produziu mapas aeromagnéticos e aerogamaespectrométricos com objetivos de estabelecer um modelo geofísico correlacionado com a geologia de superfície a fim de testar os modelos geológicos propostos para a evolução do Escudo Sul-rio-grandense.

Orlandi Filho *et al.* (1990 *apud* Vasconcellos *et al.*, 1994) elaborou mapas de contorno dos canais de contagem total, urânio, tório, potássio e suas respectivas razões (U/Th, U/K e Th/K) na Folha Piratini no Estado do Rio Grande do Sul, para sua utilização como ferramenta auxiliar na cartografia geológica e na elaboração de mapas metalogenéticos.

Porcher *et al.* (1995) elaboraram mapas aeromagnéticos e aeroaerogamaespectrométricos na Folha Passo do Salsinho, na região sudeste do Estado do Rio Grande do Sul, na escala 1:50000, com objetivo de integrá-los ao mapa geológico da região. Foram elaborados mapas nos canais de contagem total, urânio, tório, potássio, razões U/Th, U/K e Th/K, enquanto que a partir dos dados magnéticos foram produzidos mapas de contorno do campo total, de primeira derivada com redução ao pólo, susceptibilidade magnética aparente e de continuação para cima (1000 metros acima do terreno).

Roldão (2000) elaborou mapas aeroaerogamaespectrométricos nos canais de contagem total, tório, urânio e potássio, enquanto para dados aeromagnéticos foram elaborados mapas do campo magnético total de primeira derivada vertical, integral vertical com objetivos de correlacionar algumas das principais ocorrências de cobre e ouro na região oeste do Escudo Sul-rio-grandense com mapas estruturais e geológicos.

# Capítulo 2

## Contexto Geológico

### 2.1. Introdução

Esse capítulo apresenta uma síntese geológica, em termos locais e regionais, dos principais litotipos inseridos no Complexo Bossoroca (Seqüência Campestre e Seqüência Arroio Lajeado). Importantes características como geoquímica, petrografia, metamorfismo e deformação auxiliam nessa caracterização com a finalidade de se integrar aos dados geofísicos.

Vasconcellos *et al.* (1994) afirmam que para se utilizar a magnetometria na prospecção mineral deve-se ter algum conhecimento sobre as rochas da área em estudo, tais como a sua geoquímica, mineralogia e, se possível, a idade. Grant (1984) salienta que para uma interpretação útil dos dados em pesquisa geofísica magnetométrica, é necessário reconhecer os fatores que são mais influentes na determinação da importância das propriedades magnéticas. Características inerentes às propriedades das rochas, tais como conteúdo de ferro total, estado de oxidação, ambiente de cristalização inicial, grau de metamorfismo e os principais elementos químicos maiores são muito importantes.

Dickson ; Scott (1997) indicaram que o potássio é o principal elemento químico na pesquisa aerogamaespectrométrica para depósitos auríferos. Embora o Au encontre-se muitas vezes associado a veios de quartzo em depósitos vulcanossedimentares, a alteração

hidrotermal das rochas encaixantes pode fornecer halos detectáveis. O antagonismo entre o tório e o potássio (Ostrovskiy 1975), ou seja, aumento de potássio nesses halos em relação ao tório, é a principal característica determinada em pesquisa aerogamaespectrométrica, tornando-se necessária, portanto, a caracterização desses elementos no contexto geológico.

## 2.2 Contexto geológico regional

Almeida ; Hasui (1984) posicionam o Escudo Sul-rio-grandense na Província Mantiqueira que corresponde ao Sistema Brasileiro Sudeste, estendendo-se desde o Uruguai até a Bahia, com idades do Arqueano ao Eopaleozóico (Figura 2.1 (a)).

Chemale Jr. (2000) salienta que a Província Mantiqueira e os Cinturões Pan-Africanos são resultado do fechamento do oceano Adamastor que ocupou aproximadamente a posição atual da porção central e sul do Atlântico Sul. Assim, formaram-se montanhas semelhantes às cadeias de Montanhas Mesocenozóicas. Processos geológicos posteriores à formação dessas montanhas, tais como: deformação, magmatismo, erosão e sedimentação, originaram um antigo sistema de montanhas arrasado e segmentado.

Em termos continentais são reconhecidos os Cinturões Saldanha, Gariep, Damara e Kaoko, no sudeste da África, os Cinturões Dom Feliciano, Tijucas, Vila Nova, Sierras Pampeanas e rochas brasileiras situadas ao sul da Sierra de La Ventana, no sul da América do Sul. Esses conjuntos de rochas pertenceriam a um único Sistema de Montanhas que poderia ser explicado pela movimentação de placas neoproterozóicas, definidas como Kalahari, Congo-São-Francisco e Rio de La Plata (Figura 2.1 (b)).

Há dois ciclos tectônicos principais durante o período entre o Neoproterozóico e o Eopaleozóico (1000 Ma e 500 Ma), o Ciclo São Gabriel no período entre 1000 Ma e 700 Ma e o Ciclo Dom Feliciano entre os períodos 650-540 Ma, no qual são reconhecidas lascas de placas adjacentes que são representadas por corpos granito-gnássicos e anfibolíticos paleoproterozóicos e, mais raramente, Arqueanos.

## 2.3 Contexto geológico local

Nesse trabalho foi escolhida a caracterização litoquímica apresentada por Koppe (1990), onde as rochas que compõem a região do Complexo Bossoroca são denominadas de Seqüência Campestre e Seqüência Arroio Lajeado. Porcher *et al.* (1995) inserem a Seqüência Arroio Lajeado no Complexo Metamórfico Básico-Ultrabásico e a Seqüência

Campestre no Cinturão Metametavulcanossedimentar, Unidade Metavulcano-Clástica. Hartmann *et al.* (2000) insere a Formação Cerro do Ouro e a Formação Campestre no Cinturão Bossoroca que corresponderia à Seqüência Arroio Lajeado e à Seqüência Campestre, respectivamente. A Figura 2.1 (c), mostra o posicionamento da área no Escudo Sul-rio-grandense e a Figura 2.2 mostra o mapa geológico local da região do Complexo Bossoroca.

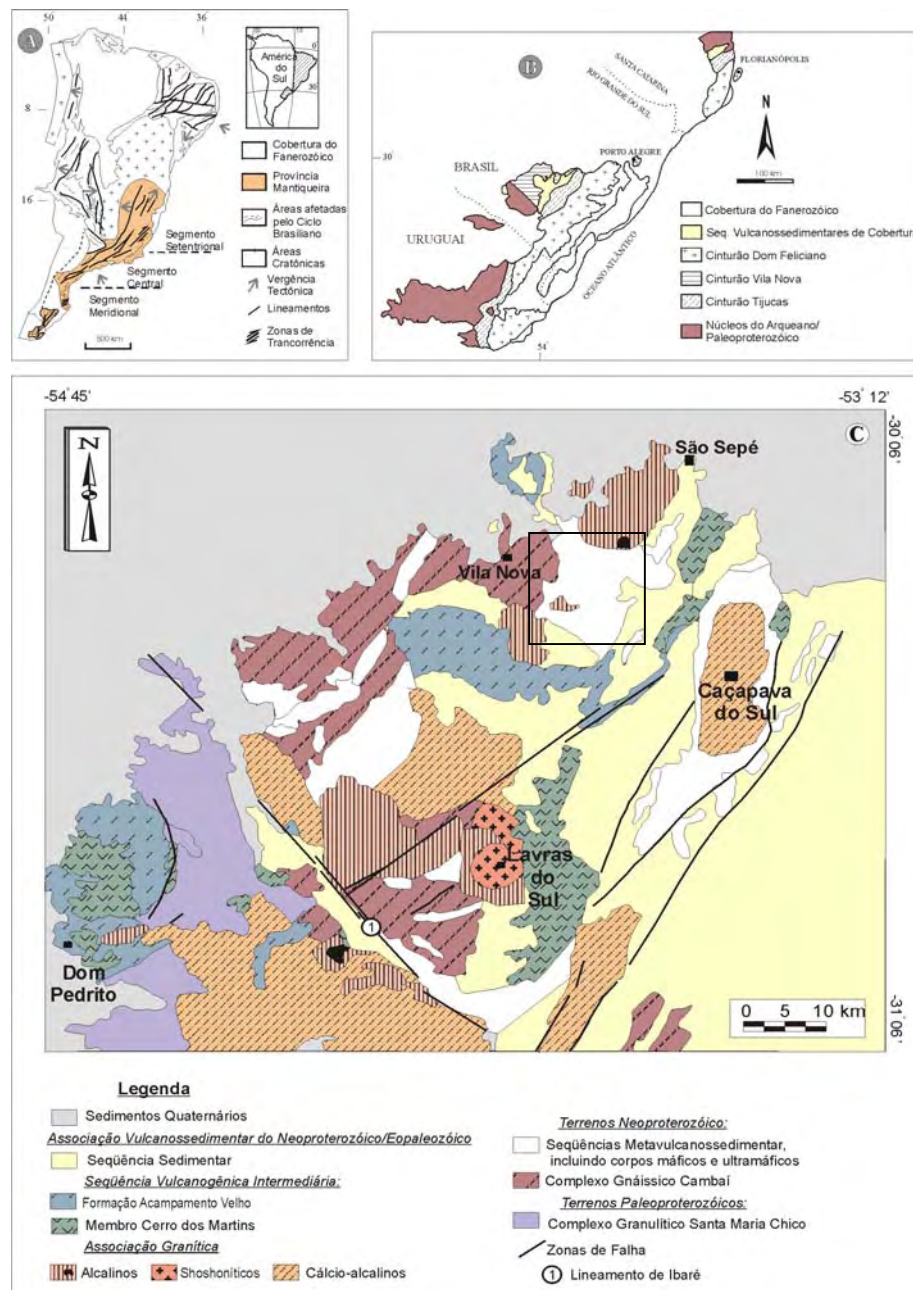


Figura 2.1. Posicionamento geotectônico da região do Complexo Bossoroca (quadrado), modificado de Roldão, 2000, (a) Província Mantiqueira (Hasui, 1984) (b) unidades geotectônicas da Plataforma Sul-Americana e (c) posicionamento da área de trabalho no Escudo Sul-rio-grandense.

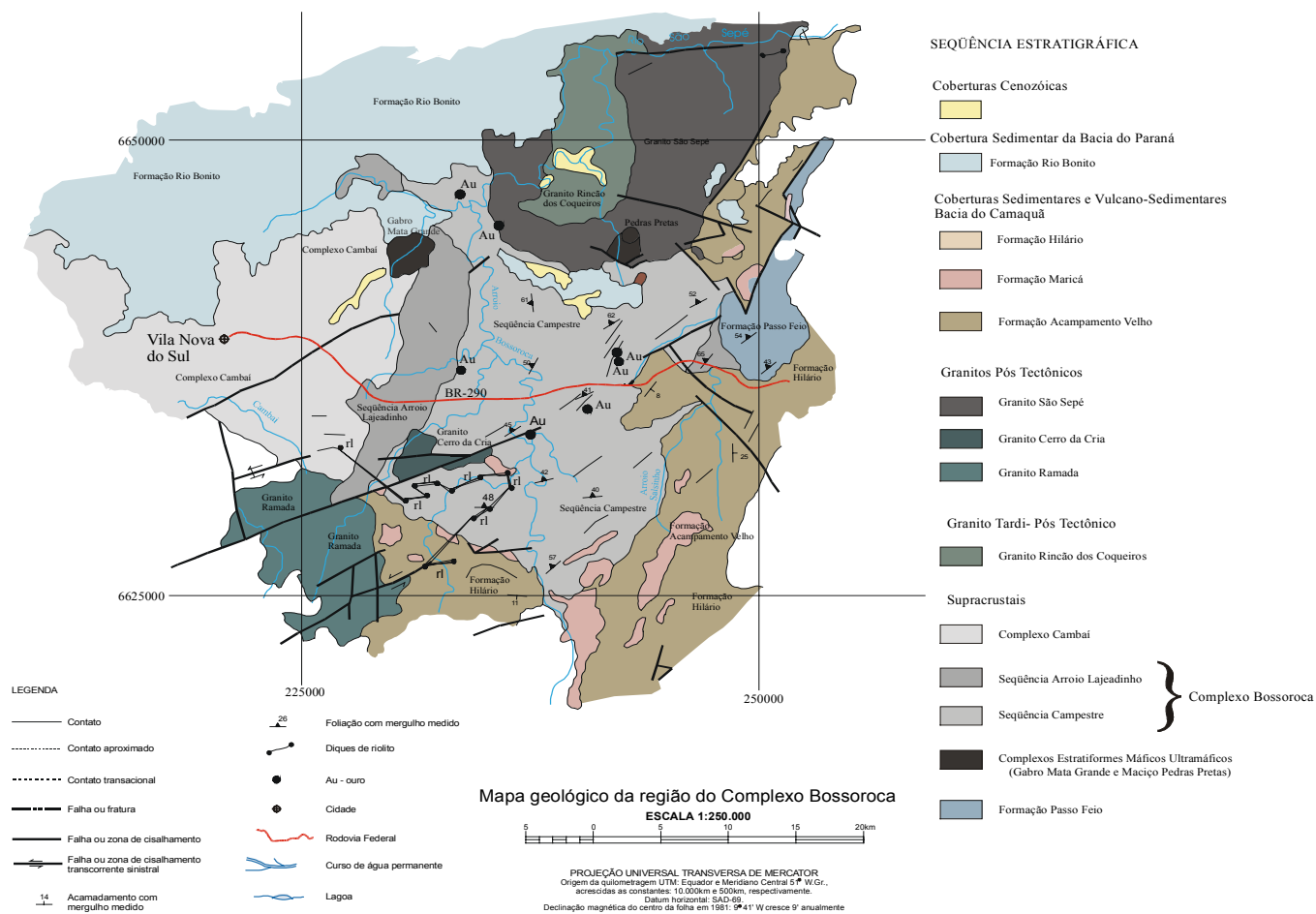


Figura 2.2. Mapa geológico da região do Complexo Bossoroca, modificado da Carta de Cachoeira do Sul (CPRM, 2000).



### **2.3.1 Seqüência Arroio Lajeado**

Essa seqüência é composta predominantemente por xistos magnesianos, serpentinitos, metabasaltos, metagabros, metacherts, formações ferríferas bandadas, metatufos e outras rochas metassedimentares, principalmente metargilitos. Essa seqüência faz contato a leste com a Seqüência Campestre por meio de uma falha transcorrente com possível movimentação dextral associada a uma zona de cavalgamento, a oeste com o Complexo Cambaí, delimitado por falhas transcorrentes com possível movimentação dextral associada, também a uma zona de cavalgamento, (Viter 1997), de acordo com Zarpelon (1986). A noroeste, com um litotipo máfico-ultramáfico denominado Gabro Mata Grande, e ao norte estão recobertos por sedimentos do Alogruppo Guaritas da Bacia do Paraná e Alogruppo Bom Jardim da Bacia do Camaquã, compostos pelas Formações Acampamento Velho e Maricá.

#### **2.3.1.1 Petrografia da Seqüência Arroio Lajeado**

##### **2.3.1.1.1 Rochas ultramáficas**

As rochas ultramáficas são constituídas, em sua maior parte, por xistos magnesianos, que circundam corpos alongados de variadas dimensões de serpentinitos (Koppe 1990). Os xistos magnesianos distribuem-se em intercalações centimétricas a métricas com corpos serpentínicos, xistos básicos, formações ferríferas bandadas e metacherts. Em função das diferenças de composição mineralógica, podemos descrever os seguintes litotipos: talco tremolita xistos, talco xistos, tremolititos, clorititos e clorita carbonato xistos. A mineralogia principal para esta associação compreende tremolita, clinocloro, talco, antofilita, cumingtonita, carbonatos, olivina, serpentina, espinélio, magnetita, rutilo, ilmenita e raramente quartzo, plagioclásio e epidoto.

##### **2.3.1.1.2 Rochas básicas**

O conjunto de rochas básicas é representado por metavulcanoclásticas, metabasitos, actinolita xistos, anfibolitos e metagabros. Essas unidades ocorrem em níveis de espessura

centimétricas até seqüências contínuas e espessas. Alternam-se com xistos magnesianos, formações ferríferas e metacherts. As rochas metavulcanoclásticas estão constituídas essencialmente por metatufos a cristal. Os fragmentos de cristais são dimensionados, ocorrendo às vezes, em finas lâminas ricas em plagioclásio e anfibólio. A Tabela 2.1 mostra os principais elementos maiores para anfibólios de rochas básicas da Seqüência Arroio Lajeado, onde se nota a presença de baixos teores de ferro e magnésio e baixos teores de potássio.

Os metamorfitos apresentam fenoblastos de actinolita, cuja matriz é constituída por pequenos grânulos de feldspato, quartzo, actinolita, clorita e epidoto, ilmenita e pirita aparecem secundariamente.

Os actinolita xistos, de textura nematoblástica, compreende mineralogia a base de plagioclásio, clorita, epidoto, carbonato, quartzo e opacos complementam a mineralização principal.

Tabela 2.1. Análise química dos anfibólios das rochas metamórficas básicas da Seqüência Arroio Lajeado, modificado de Zarpelon (1986).

Elemento/Amostra	PZ9b	PZ229	PZ431	PZ443	PZ205b
SiO <sub>2</sub>	54.2	55.1	55.3	54.0	50.1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.9	3.1	2.85	3.0	61
FeO	13.1	13.5	13.4	12.8	8.5
MgO	14.7	14.5	14.4	13.9	18.5
MnO	0.3	0.29	0.29	0.31	0.31
CaO	12.1	11.9	10.4	12.0	11.3
Na <sub>2</sub> O	0.31	0.28	0.2	0.25	0.81
TiO <sub>2</sub>	0.03	0.04	0.02	0.03	0.40
K <sub>2</sub> O	0.02	0.03	0.02	0.01	0.05
Total	97.66	98.74	97.48	96.30	96.11

Os metabasitos deformados possuem mineralogia a base de plagioclásio, hornblenda e quartzo, imerso em matriz rica em actinolita, plagioclásio, epidoto, quartzo, clorita e opacos.

A mineralogia principal dos anfibolitos maciços é representada por anfibólios, e plagioclásios, com variadas proporções de clorita, carbonato, diopsídio, epidoto, e quartzo, sendo acessórios o zircão, apatita, esfeno e opacos. Os plagioclásios dominantes são as albitas, com algumas ocorrências de andesina.

Os metagabros de textura isótropa maciça constituem-se de plagioclásio, hornblenda-actinolita, clorita, epidoto, apatita, carbonato e opacos.

### 2.3.1.1.3 Rochas químicas

As rochas formadas por precipitação química, abrangem metacherts e formações ferríferas bandadas incluindo, também composições intermediárias designadas metacherts ferruginosos. Estes litotipos ocorrem associados às rochas máficas e ultramáficas da mesma seqüência (Koppe, 1990).

As formas dominantes de ocorrência envolvem lentes e camadas de espessura variada desde centímetros até vários metros. A textura é isótropa e bandada, constituída preferencialmente por quartzo e opacos, representados por magnetita, hematita, pirita, arsenopirita e calcopirita. Localmente foram encontradas partículas de ouro. A granulometria varia de fina a média.

As formações ferríferas estão constituídas essencialmente pela fácies óxidos e, raramente, pela fácies sulfeto. Na fácies óxido, a textura bandada é marcada pela intercalação de bandas milimétricas, constituídas por quartzo microcristalino ou magnetita e hematita.

### 2.3.1.2 Geoquímica da Seqüência Arroio Lajeado

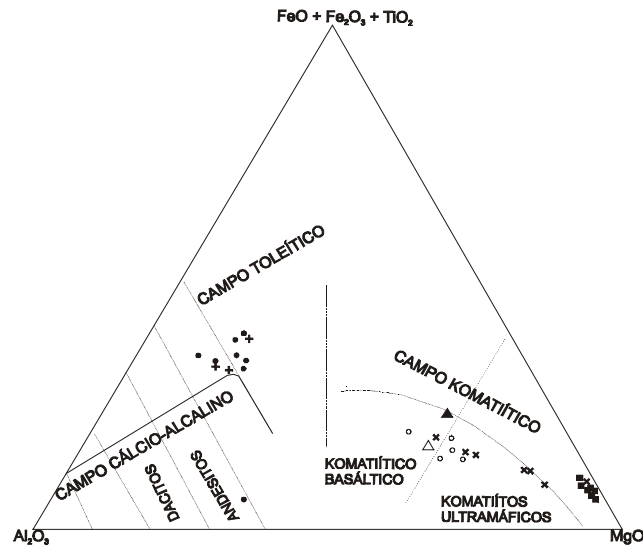
Porcher *et al* (1995), caracterizam as rochas do Complexo Metamórfico Básico Ultrabásico por meio de análises químicas de óxido principais e da análise mineralógica normativa, agruparam as litologias em três associações principais, as quais mostram correspondência petrográfica apresentadas por Koppe (1990):

- Associação de gabros e basaltos;
- Associação de serpentinitos;
- Associação metassomática

Com o auxílio do diagrama ternário do tipo Jensen ; Pike (1976), Figura 2.3, pode-se definir a afinidade dos serpentinitos do Complexo como sendo uma suíte komatiítica peridotítica enquanto que as rochas metassomáticas apresentam um *trend* associado a uma suíte komatiítica basáltica.

Koppe (1990), Wildner (1990) e Zarpelon (1986) com base em dados petrográficos e litoquímicos, avaliam que as rochas vulcanossedimentares foram intrudidas por corpos de

rochas básicas e ultrabásicas de mesma filiação magmática. As observações dos dados petroquímicos indicam para os serpentinitos um caráter residual cumulático e um ajuste ao *trend* komatiítico. Rochas como os xistos magnesianos, metagabros e os anfibolitos, foram classificadas como sendo basaltos komatiíticos passando a toleítos magnesianos e toleítos normais.



**Legenda:**

- |                  |                     |                      |
|------------------|---------------------|----------------------|
| △ metassomatitos | ● basaltos e gabros | × xistos magnesianos |
| + xistos básicos | ○ clorita xistos    | ▲ serpentinitos      |

Figura 2.3. Diagrama de Jensen ; Pike (1976), para as rochas da Seqüência Arroio Lajeado, modificado de Koppe (1990).

### 2.3.1.3 Metamorfismo

Koppe (1990), em estudos provenientes de amostras de sondagens, observações ao microscópio eletrônico e informações adicionais da composição química dos principais minerais através de microsonda eletrônica, identificou as seguintes paragêneses observadas na Seqüência Arroio Lajeado do Complexo Bossoroca:

- Xistos magnesianos e serpentinitos
  - a. Tremolita + clinocloro + serpentina
  - b. Tremolita + talco
  - c. Olivina + talco

- d. Serpentina + clinocloro  $\pm$  talco
  - e. Tremolita + plagioclásio + quartzo  $\pm$  epidoto
- Xistos básicos
    - a. Albita + actinolita + clinozoizita + clorita  $\pm$  carbonato
    - b. Albita + actinolita/hornblenda + clinozoizita
    - c. Albita + actinolita/hornblenda
    - d. Actinolita/hornblenda + clorita + quartzo

As paragêneses de *a*, *b*, *d*, *e* estão associadas e indicam condições de fácies xisto verde inferior, (Koppe 1990). Paragênese do tipo *c* indicam condições de metamorfismo de fácies xisto verde superior a anfíbolito.

Wildner (1990) sugeriu que o evento metamórfico que afetou o complexo (meta) básico-ultrabásico, atingiu a fácies xisto verde superior a anfíbolito, com base na paragênese olivina + talco, acompanhada de clinocloro, tremolita, magnesita, e opacos nas rochas ultrabásicas. Para as rochas metabásicas, indicou uma fácies epidoto anfíbolito a anfíbolito devido à transição actinolita/hornblenda e albita/oligoclásio.

### 2.3.2 Seqüência Campestre

Seis ocorrências auríferas identificadas na área desse trabalho estão inseridas na Seqüência Campestre, tendo por encaixantes principais metatufos. Os litotipos, constituintes dessa seqüência, podem ser agrupados da seguinte forma: 1) rochas vulcanoclásticas, 2) rochas epiclásticas e 3) rochas químicas. Esta seqüência está limitada ao norte pelo Granito São Sepé, pelo Alogrupo Bom Jardim e o Alogrupo Guaritas, da Bacia do Camaquã e pela Formação Rio Bonito da Bacia do Paraná, à leste por rochas vulcânicas pertencentes ao Alogrupo Acampamento Velho da Bacia do Camaquã, ao sul pelo pelos granitos Cerro da Cria e Ramada e a oeste pela Seqüência Arroio Lajeado (Figura 2.2).

### **2.3.2.1 Petrografia da Seqüência Campestre**

#### **2.3.2.1.1 Rochas vulcanoclásticas**

Koppe (1990) descreve as rochas vulcanoclásticas como sendo representadas essencialmente por metatufos finos e grosseiros, metatufos a cristal, metatufos lapilíticos, metaglomerados, metacherts, e rochas metavulcânicas. Vários ciclos de atividade vulcânica formaram espesso pacote de material piroclástico de composição básica a ácida, com dominância de termos intermediários e camadas de espessura extremamente variada, desde finamente laminadas (< 0,3 cm) até camadas (>1 metro). Dominantemente, os depósitos foram gerados por fluxo de cinzas, púmices, lavas e, secundariamente, depósitos relacionados a processos de surgência e queda de material ejetado durante os eventos vulcânicos.

Os metatufos lapilíticos apresentam na matriz, essencialmente fina, quartzo, plagioclásio, clorita, epidoto, sericita, biotita, e outros minerais acessórios como sulfetos, opacos, zircão e carbonatos. Nesta matriz, encontra-se fragmento de cristal, fragmentos de rocha e púmice.

Metatufos a cristal apresentam granulação fina a média, sendo compostos essencialmente por quartzo, plagioclásio, epidoto, clorita, biotita, sericita e opacos. Também é comum a presença de turmalina, granada e carbonatos na área da Mina Bossoroca. Frações mais grosseiras e lapilítica apresentam quartzo azulado e plagioclásio como cristais dominantes.

Metaglomerados e metacherts apresentam matrizes finas ou lapilítica e a composição mineralógica é a mesma descrita para tufos finos e grosseiros, com predominância de plagioclásio, quartzo, clorita e epidoto.

Metavulcânicas ocorrem intercaladas à pilha vulcanoclástica, sendo dominante a composição intermediária. De matriz microcristalina aparecem pórfiros de plagioclásio e quartzo.

### 2.3.2.1.2 Rochas epiclásticas

As rochas epiclásticas da Seqüência Campestre são constituídas por metarenitos, metargilitos, e metaconglomerados e estão associadas aos litotipos metavulcanoclásticas, tornando-se difícil a distinção entre as unidades tipicamente vulcanoclásticas e as epiclásticas (Koppe, 1990).

A mineralogia básica para os arenitos é quartzo, plagioclásio (albita), sericita, muscovita, epidoto, clorita, carbonato (calcita), zircão, grafite, opaco e fragmentos de rocha.

Os pelitos são representados por siltitos e argilitos, apresentando intercalações e acamamento gradacional com arenitos. Mineralogicamente são constituídos por agregados de grãos subarredondados e mal selecionados, de quartzo e plagioclásio imersos em matriz fílitosa, microcristalino representada por sericita, clorita, epidoto, biotita, zircão, apatita, turmalina, pirita, grafite, e outros opacos.

Os conglomerados apresentam destacada participação no pacote metavulcanossedimentar, e em alguns locais, confundem-se com possíveis litotipos de origem híbrida, dominados essencialmente por fragmentos vulcânicos, gerando dificuldades de identificação como material caracteristicamente epiclástico ou vulcanoclástico. Os fragmentos variam de poucos centímetros a mais de 50 cm de diâmetro, de composição polimítica com autoclastos, seixos de quartzo, xistos e granitos. A matriz, de granulação fina a média, é constituída essencialmente por quartzo, plagioclásio, clorita, sericita e epidoto. As características apontam para uma forte participação de processos vulcânicos na constituição desses depósitos, sugerindo um processo de geração envolvendo correntes de alta densidade, semelhantes aos depósitos do tipo *Lahaar*, Koppe (1990) e Wildner (1990).

### 2.3.2.1.3 Rochas sedimentares químicas

De acordo com Koppe (1990) as rochas químicas ocorrem em menor proporção nesta seqüência do que na Seqüência Arroio Lajeado, porém, apresentam as mesmas características como predomínio de metacherts sobre formações ferríferas ou metacherts ferruginosos. Alternam-se principalmente com metatufos finos e grosseiros.

Mineralogicamente são constituídos de quartzo e, secundariamente, magnetita e hematita. Alguns acessórios como sericita e sulfetos estão eventualmente associados.

Partículas de ouro com até 1mm de comprimento foram identificadas em afloramento nas proximidades da Mina Bossoroca. Localmente, foram identificadas rochas de origem mista constituída pela deposição de tufos finos e precipitação de sílica, compondo o que designamos de tufos chérticos.

### 2.3.2.2 Metamorfismo da Seqüência Campestre

Da mesma forma que foi feito para a identificação das paragêneses na Seqüência Arroio Lajeado, os mesmos critérios foram utilizados na identificação das paragêneses metamórficas para Seqüência Campestre.

- Metatufos a cristal
  - a. Quartzo + oligoclásio/albita + biotita + sericita + epidoto
  - b. Quartzo + albita/oligoclásio + biotita + hornblenda + almandina/espessartita
  - c. Quartzo + albita/oligoclásio + biotita + hornblenda
  
- Metatufos finos
  - a. Quartzo + biotita + clorita + albita/oligoclásio
  - b. Quartzo + albita/oligoclásio + clorita
  - c. Quartzo + biotita + clorita + hornblenda + oligoclásio
  - d. Quartzo + sericita + epidoto + carbonato + albita
  
- Metassiltito grafitoso
  - a. Quartzo + clorita + epidoto + grafite
  
- Metavulcânicas
  - a. Quartzo + sericita + clorita + epidoto + albita + carbonato
  - b. Quartzo + carbonato + epidoto
  - c. Quartzo + sericita + muscovita + epidoto



- Metassiltitos e metarenitos
  - a. Quartzo + muscovita + andaluzita + clorita
  - b. Quartzo + sericita + clorita + carbonato + albita ± pirita
  - c. Quartzo + muscovita + albita + biotita

As paragêneses *b*, *c*, *f*, *l* e *n* denotam condições de metamorfismo de fácies xisto verde médio e superior conforme. As demais paragêneses, incluindo àquelas da Seqüência Arroio Lajeado, refletem um metamorfismo de fácies xisto verde inferior, zona da clorita (Koppe, 1990).

As rochas supracrustais foram afetadas por um metamorfismo regional de fácies xistos verdes inferior para médio e superior, passando a anfibolito nas proximidades do Complexo Cambaí. O autor indica que eventos metamórficos de contato e hidrotermalismo se sobrepõem ao metamorfismo regional, imposto pelas intrusivas essencialmente graníticas que atuaram durante o Ciclo Brasileiro. Foram identificadas as fácies epidoto – albita – hornfels – e hornblenda – hornfels.

Porcher *et al* (1995) colocam os mesmos eventos metamórficos regionais associados aos eventos deformacionais e de contato, ocorridos no Cinturão Metavulcano - Sedimentar.

### 2.3.2.3 Geoquímica da Seqüência Campestre

Koppe (1990) utilizou dados de elementos maiores, traços e terras raras provenientes de testemunhos de sondagens da Mina Bossoroca, onde os resultados mais importantes estão colocados nas Tabelas (2.2 a 2.4). Segundo o autor, a análise dos dados geoquímicos não pode ser efetivada de imediato, podendo provocar erros decorrentes de prováveis modificações de carga geoquímica dos protólitos dos atuais litotipos integrantes desta seqüência. Essas alterações podem ter ocorrido desde o início de formação dessas rochas e prosseguido durante a sua evolução geológica pela ação de processos metamórficos, hidrotermais, metassomáticas ou intempéricos.

A análise de elementos maiores no diagrama ternário de Irvine e Barragar (1971), revela que os dados distribuíram-se principalmente nos campos riodacíticos a dacíticos e secundariamente nos campos dos andesitos, latitos traquitos e riolitos. Posteriormente, resultados obtidos em diagramas P x Q de Debon e Le Fort (1982) mostraram que os termos dominantes compreendem dacitos, quartzo-andesitos, riodacitos e basaltos, secundariamente, aparecem latibasaltos, quartzo-latandesito e quartzo-latitos. Porém, baseado em diagrama

triangular do tipo Jensen ; Pike (1976), Figura 2.4 (b), os termos dominantes são andesíticos e dacíticos.

Tabela 2.2. Análise química (% em peso), média de três determinações, em biotitas das rochas metamórficas da Sequência Campestre, na Mina Bossoroca, modificado de Koppe (1990).

Elemento/Amostra	VB-311	MB – 1627	MB – 1617 A	MB - 2503
SiO <sub>2</sub>	35.33	34.81	36.64	34.66
TiO <sub>2</sub>	1.60	1.78	1.86	1.42
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.24	16.51	17.07	18.93
FeO	19.78	20.50	20.04	23.41
MnO	0.25	0.14	0.22	0.36
MgO	10.33	8.20	9.22	9.26
CaO	0.39	0.05	0.00	0.05
Na <sub>2</sub> O	0.09	0.09	0.14	0.04
K <sub>2</sub> O	9.21	9.56	9.73	6.00
Total	94.22	91.64	95.05	94.17

Tabela 2.3. Análise química (% em peso), em anfibólios em meta-dioritos da Mina Cerrito do Ouro, na Sequência Campestre, modificado de Viter (1997).

Elemento/Amostra	MDC – 1	MDC - 2
SiO <sub>2</sub>	56.4776	54.138125
TiO <sub>2</sub>	0.02298	0.078525
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.83472	3.234025
FeO	5.92406	7.5812
MnO	0.14322	0.204525
MgO	19.87618	18.216275
CaO	13.18206	12.699125
Na <sub>2</sub> O	0.0232	0.080975
K <sub>2</sub> O	0.02096	0.197525
H <sub>2</sub> O	2.10728	2.47775
F	0.04654	0.4282
Total	98.75926	98.793

Tabela 2.4. Composição média de óxidos (% em peso) de andesitos basaltos da Seqüência Campestre, modificado de Koppe (1990).

Elemento	Seqüência Campestre
SiO <sub>2</sub>	62.98
TiO <sub>2</sub>	0.66
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.73
FeO	1.58
MnO	4.89
MgO	2.18
CaO	3.61
Na <sub>2</sub> O	4.61
K <sub>2</sub> O	1.23
FeO / Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.10
Na <sub>2</sub> O / K <sub>2</sub> O	3.74

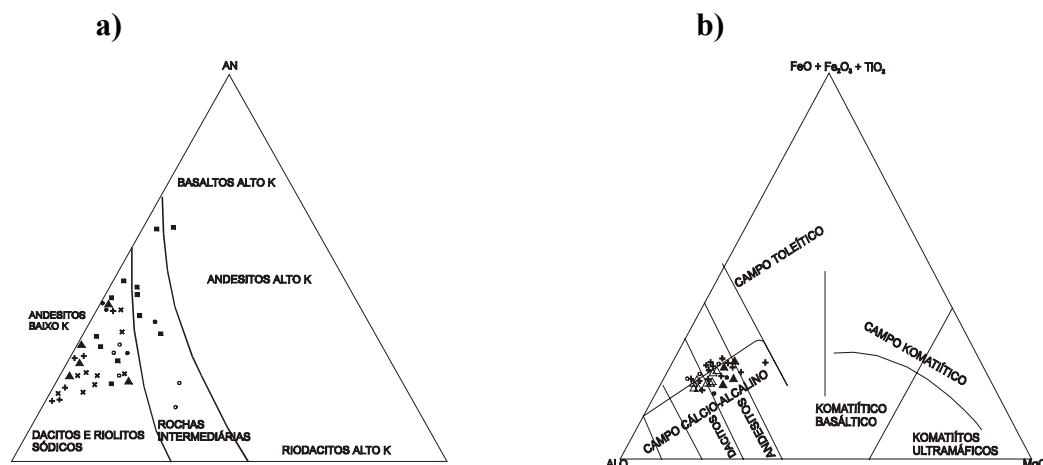
Elementos maiores como Na, K, Ca e SiO<sub>2</sub>, podem ter sido mobilizados pelos processos geológicos envolvidos na formação dos protólitos. Foi utilizado, para identificar litotipos cálcio alcalinos de baixo potássio, um diagrama ternário do tipo Ab-An-Or de Irvine ; Barragar (1971), no qual resultou em andesitos de baixo K ou dacitos e riolitos sódicos, como visto na Figura 2.4 (a).

Estudos baseados em cálculos normativos para as amostras da Seqüência Campestre apontam para uma série cálcio alcalino de baixo potássio, com seus litotipos de origem ígnea. Mesmo rochas como metassedimentos grafitosos, plotaram nesse campo, revelando sua forte associação ao ambiente vulcânico.

A análise de dados de elementos terras raras, indicaram que a atuação dos processos de alteração englobando processos hidrotermais e metamórficos provocaram modificações das características originais dos litotipos, que por sua vez afetaram os elementos mais móveis como Na, K, Ca, Mg, Fe e Si. As alterações, representadas principalmente por silicificação, carbonatização e cloritização, promoveram forte dispersão dos dados químicos.

Porcher *et al* (1995), com base em resultados químicos da Unidade Metavulcano-Clástica, apresentaram os seguintes resultados:

- A utilização dos critérios de identificação de mobilidade dos elementos químicos demonstrou que a composição dos litotipos vulcanogênicos metamorfisados reflete, mesmo que parcialmente, as características primárias da associação;
- Litoquimicamente, os protólitos vulcanogênicos foram classificados como andesitos basálticos, andesitos e dacitos;
- Apresentam baixa alcalinidade, a qual baseia-se nos teores de  $\text{Na}_2\text{O}$ , caracterizando uma alcalinidade sódica;
- Dados normativos, teores em  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e outros parâmetros indicam afinidade com rochas da série calcialcalina, hiperstenítica, para toda a unidade;
- Os padrões de terras raras obtidas demonstram sintonia com padrões relacionados a rochas vulcânicas félsicas modernas e uma clara discrepância com os padrões descritos para rochas andesíticas arqueanas.



**Legenda:**

- ▲ - tufo grosseiros    + - tufo finos    △ - tufo a cristal    ✕ - sedimentos grafitosos  
 ○ - tufo grafitosos    AB – albita    OR – ortoclásio    AN – anortita

Figura 2.4. Diagrama ternário de Irvine e Barragar, 1971 (a) e diagrama de Jensen ; Pike, 1976 (b) para as rochas da Sequência Campestre, modificado de Koppe (1990).

### 2.3.3 Deformação do Complexo Bossoroca

Esse item é de fundamental importância, pois serve de base para interpretação das estruturas, em escala regional, que podem ser detectadas por estudos aerogeofísicos,

principalmente aeromagnéticos. Desta maneira, será dada ênfase à caracterização dos principais tipos e direções de falha nas seqüências Arroio Lajeado e Campestre encontrados na literatura.

De acordo com Koppe (1990), a foliação regional apresenta um valor médio de N25°E/54°NW, que indica uma dispersão dos dados segundo uma direção SE/NW, o que pode ser inserido num contexto de sistema de falhas de empurrão. Foi também observadas duas fases de deformação:

- A primeira fase de deformação com formação de lineações minerais, dobras isoclinais a em bainha, falhas de empurrão e deslocamento, falhas normais com direção NW-SW;
- Segunda fase de deformação com geração de falhas inversas, crenulação e clivagem de crenulação.

À primeira fase de deformação confere-se um regime dúctil enquanto que à segunda fase, um regime dúctil-rúptil a rúptil e ambas são englobadas num único evento deformacional progressivo (estrutural). Foi verificado também pelo autor falhamentos e fraturamentos gerados em regime rúptil que afetaram todo o complexo, imprimindo orientações preferenciais NNE-SSW e, secundariamente, NW-SE e E-W.

Viter (1997), em seu trabalho de mestrado na Seqüência Campestre nos depósitos auríferos da Mina Bossoroca, Guardinha e Cerrito do Ouro, com auxílio de medições em estruturas planares e lineares, delimitou uma zona de cisalhamento na região, caracterizando-a por ser transcorrente, devido ao alto mergulho das foliações e pelas lineações de estiramento de baixo ângulo com movimentação dextral, evidenciado por porfiroclastos com caudas assimétricas.

Nas fases tardias, relacionadas à zona de cisalhamento, observou-se várias falhas, normais e oblíquas, de direção preferencial NE, e secundariamente, direções NW e N-S, que cortam as estruturas principais. Outras falhas menores de caráter transcorrente e inversas também foram observadas. Esses eventos foram registrados nos litotipos da Seqüência Campestre, a partir de clivagem de fratura de diferentes orientações.

Porcher (1995) indicou que as Unidades do Cinturão Metametavulcanossedimentar foram afetadas por quatro fases de deformação, as duas primeiras de caráter tangencial, enquanto as últimas associam-se a movimentos transcorrentes. Foi postulado para este Cinturão um único evento metamórfico regional, relacionado à fase de deformação D<sub>1</sub> (caracterizada por uma foliação transposta e dobramentos isoclinais gerados pela deformação D<sub>2</sub>), o qual foram afetadas por intrusões graníticas posteriores e por eventos de metamorfismo

dinâmico, em faixas localizadas, associadas às fases de deformação  $D_3$  (redobramentos de um bandamento gerado em  $D_2$ ) e  $D_4$  (formação de um sistema de sinformes e antiformes com planos axiais de mergulhos acentuados). O Complexo Metamórfico Básico-Ultrabásico teve uma evolução estrutural em conjunto com as Unidades Metamavulcanossedimentares, pelo menos a partir da segunda fase de deformação, a qual é interpretada como responsável pela justaposição de ambas unidades.

Um sistema de falhas e fraturas foi descrito Naime (1987), de forma genérica podendo ser destacadas direções variando entre  $N30^\circ-50^\circ W$ , evidenciados por fotografias aéreas, possivelmente resultantes de reativações de zonas de cisalhamento transcorrentes relacionados à fase  $D_4$  de deformação. Um sistema de falhas ENE-WSW-E-W, aparentemente, apresenta um caráter transcorrente, tendo em vista que desloca os granitos Cerro da Cria e Ramada, com movimentação levógira. Um caráter retilíneo dos limites das coberturas metavulcanossedimentares e seu paralelismo com sistema de falhas  $N30^\circ-40^\circ E$  sugerem que a implantação da bacia de deposição dessas seqüências foi controlada por esse sistema.

Zarpelon (1986) identificou cinco fases de dobramentos cada qual com suas feições estruturais próprias. A Tabela 2.5 destaca-se as cinco fases de dobramento caracterizadas por foliações, lineações, deformações e metamorfismo. Importante ressaltar que a foliação original  $S_0$  é caracterizada por intercalações de metacherts e formações ferríferas em meio às rochas máficas e ultramáficas, pela intercalação de metabasitos em xistos-Mg e serpentinitos através de níveis vesiculares ou concentrações de cristais em metatufos, e a variação composicional com níveis enriquecidos em micas e quartzo com variação granulométrica.

O autor também identificou dois tipos de falhamentos na região do Complexo Bossoroça:

- Transcorrentes ou cisalhamento por desacoplamento;
- Cisalhamentos discretos.

### **2.3.3.1 Falhas transcorrentes**

De acordo com Zarpelon (1986) características como faixas cataclásticas constituídas por blastomilonitos, dobras de arrasto com eixos verticalizados, estiramentos minerais e descontinuidades metamórfico-deformacional regional entre os gnaisses e as seqüências supracrustais (lado W), estão parcialmente separadas por um lineamento transcorrente. Essa zona de deformação dúctil tem uma forma linear de direção aproximada  $N20^\circ E$  em alguns

locais ocorrem migmatitos e metagranitóides concordantes com a foliação milonítica. A idade de formação desta estrutura é, provavelmente, Arqueana ou Proterozóica Inferior, uma vez que os efeitos da milonitização não foram reconhecidos nas unidades supracrustais que a interrompem.

Durante a fase três de deformação ( $D_3$ ), provavelmente, se deu a compressão e o cavalgamento das seqüências supracrustais (Arroio Lajeado) contra o embasamento granito-gnáissico (Complexo Cambaí). Esses esforços promoveram a reativação e/ou geração de falhamentos, possivelmente com componentes de empurrão, na direção geral N20°E em alguns locais preenchidos por veios de quartzo. Entre estas falhas, a mais significativa é representada pelo lineamento que coloca em contato as seqüências Arroio Lajeado e Campestre. Esta falha trunca os flancos das dobras ( $F_3$ ) desenvolvidas em ambas seqüências, o que sugerem serem sincinemáticas a  $D_3$  ou representarem reativações de alinhamentos mais antigos, relacionados às primeiras fases de deformação destas unidades.

Tabela 2.5. Principais fases de deformação relacionadas ao Complexo Bossoroca, extraído de Zarpelon (1986). Os quadros em branco indicam feições não mapeadas ou não encontradas.

	Deformação (D)	Dobras (F)	Foliação (S)	Lineação (L)	Metamorfismo (M)
Fase 1	Obliteração por formações posteriores	Microdobras intrafoliais simétricas em metabasitos e xistos-Mg; Feições mesoscópicas não encontradas	Transposição de $S_2$ sobre $S_1$ nos xistos-Mg, metabasitos, metassedimentos		$M_1$ —caracterizando $S_1$ como xisto verde, com cristais de tremolita e clorita nos metabasitos e xistos-Mg
Fase 2	$D_2$ —forte xistosidade que transpõe a foliação anterior; bandamento composicional		$S_2$ -Bandamento composicional, clivagem de fratura e micrólitos centimétricos	$L_2$ -lineação mineral, intersecção de superfície( $LS_2/S_0$ ); <i>boudins e rods</i>	$M_2$ – fácies xisto verde inferior e média próxima à zona da clorita
Fase 3	Dobras em chevron	Mesoscópicas – flexurais simétricas, não cilíndricas; dobras em chevron com dobramentos em $S_2$ , $L_2$ , $S_1$ e $S_0$ ; planos de charneiras agudos, superfícies axiais inclinadas e de mesmo comprimento (km).	Clivagem de fratura em padrão anastomosado concordante com $S_2$ em talco-xistos metacherts e veios pegmatóides	$L_3$ – lineações do tipo boudin com forte caimento (40-70°)	$M_3$ - natureza termal de fácies hornblenda-hornfels e uma auréola sobre os metamorfitos juntos aos gnaiesses do Complexo Cambaí (Vila Nova)
Fase 4	Condições superficiais	Ondulações simétricas cilíndricas com charneiras retilíneas e superfícies axiais planas - tipo flexural de deslizamento	Clivagem de fratura Não metamórfico	$L_4$ – Estrias de deslizamento no plano superficial $S_2$	
Fase 5		Dobras do tipo crenulação nos cloritas xistos			

### 2.3.3.2 Cisalhamentos discretos

Esse conjunto de falhas com direção geral N50°W com mergulhos subverticais e rejeitos variáveis, de caráter linear, não apresenta brechação nem descontinuidades litológico-estruturais marcantes. Em alguns locais, veios de quartzo e diques de riolito, provavelmente relacionados a intrusões graníticas Brazilianas, preenchem os planos de falha. O movimento geral associado a estas falhas é incerto, podendo ser de natureza normal ou inversa.

Roldão (2000), por meio de análise por imagens de satélite, identificou os principais lineamentos do oeste do Escudo Sul – rio-grandense, definidos como sendo do tipo I. Estes lineamentos podem ser caracterizados como sendo estruturas sedimentares primárias ou vulcanossedimentares até estruturas deformacionais como foliação, lineação ou bandamento gnáissico, o que possibilita a identificação de dobras e zonas de cisalhamento.

## 2.4 Evolução geotectônica

Soliani Jr. (2000) compartimentou o Escudo do Rio Grande do Sul em cinco domínios, em face de diversidade dos modelos evolutivos e com o objetivo de apresentar os dados geocronológicos disponíveis de forma mais compreensível, caracterizado por suas associações litológicas particulares. Os principais domínios são: Encruzilhada, Santana, Taquarembó, São Gabriel e Dom Feliciano.

O Domínio São Gabriel parece representar um complexo metamórfico acrescionário composto por frações máficas e ultramáficas de ofiolitos parciais, rochas metassedimentares diversas, vulcanitos e *plutons* tonalíticos e sienograníticos característicos de um arco magmático.

Chemale Jr. (2000) compartimenta o Escudo Sul-rio-grandense em seis unidades: Bloco Taquarembó, Cinturão Vila Nova, onde estaria inserido o Bloco São Gabriel e, conseqüentemente, o Complexo Bossoroca, Cinturão Tijucas e Cinturão Dom Feliciano. São propostas quatro fases de evolução geotectônica:

A Fase I que compreende eventos Neoproterozóicos que se inicia com uma crosta bem estável já no final do Mesoproterozóico, serviu de área cratônica para orogênese Kibarana ou Grënville (1.0-1.2 Ga) presente em regiões próximas geotectonicamente, como é o caso da região de Sierra Pie de Palo (San Juan, Argentina) e dos cinturões Namaqualand e Natal (Sul da África). Pelos registros de rochas do prisma Acrescionário de Palma pode-se postular a



presença de um oceano denominado Charrua, por Fragoso-Cesar (1991) que foi desenvolvido por uma fragmentação de duas placas, Rio de La Plata e Kalahari (FASE I).

Uma fase intermediária (FASE I – II), entre 900-850 Ma, teve início um processo de subducção e geração de rochas de arco de ilhas, atualmente representadas por gnaisses dioríticos a tonalíticos da região de Lavras do Sul. A presença de uma pluma mantélica na região dos Cinturões Gariep e Damara induziria a formação das unidades pré-rifts da região.

A Fase II, nos períodos entre 800-700 Ma, ocorreu uma acresção do Prisma de Acresção Palma (região frontal do Arco Magmático) e a formação do Arco Magmático Continental Tijucas. Naquele momento, começou o processo de rifteamento da Bacia Gariep, com início da formação de uma crosta oceânica próximos aos 700Ma. Visto que a área de afloramento do Cinturão Vila Nova é, em termos geotectônicos, extremamente pequena, fica difícil estabelecer o mergulho da placa Neoproterozóica Rio de La Plata. Pela presença da crosta juvenil a oeste e crosta retrabalhada ao leste justapostas lado a lado e com idades próximas, supõe-se que o mergulho tenha ocorrido para leste, sendo a placa Rio de La Plata inferior e a Kalahari a superior. O processo de rifteamento no lado da placa Kalahari ocorreu na região do Cinturão Namaqua, provavelmente no seu limite mais oeste, resultando na formação de um microcontinente, o Microcontinente ou Microplacas Encantada, cujos limites seriam de uma margem ativa convergente, a oeste e outra divergente, ao leste.

A Fase III, nos períodos entre 700 – 650 Ma, haveria um aumento de sistema de *back-arc* Gariep o que levaria à geração de um oceano ou protoceano denominado Adamastor. O processo de rifteamento está bem documentado tanto no Cinturão Gariep como no Damara, onde são identificadas seqüências de *rift* com vulcanismo e plutonismo alcalino de idade de 750 Ma. Chemale Jr. (2000) também admite pode ter sido um oceano de dimensões pequenas (ou proto-oceano), que entrou em processo de subducção em menos de 100 Ma.

A Fase IV, entre 650-540 Ma, ocorreria uma fase de subducção do protoceano Adamastor, com mergulho para oeste na margem leste da Microplaca Encantadas, com inversão de polaridade. Este processo gerou o arco Magmático Dom Feliciano, cuja granitogênese cálcio-alcalina orogênica e pico metamórfico ocorreu entre 630 e 610 Ma, com contribuição crustal. O magmatismo tardi a pós – orogênico, teve a sua geração entre 600-540 Ma.

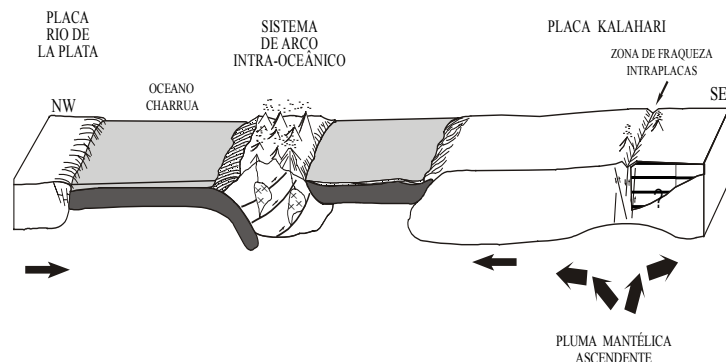
Hartmann *et al.* 2000 propõem quatro unidades geotectônicas: Batólito Pelotas, Cinturão Porongos, Bloco São Gabriel e Bloco Taquarembó. A bacia do Camaquã recobriria parcialmente as quatro unidades principais em diversos *rifts*.

O Bloco São Gabriel ocorre na parte NW do escudo e é constituído por vários cinturões metamórficos de origem diversificada. As associações pretotectônicas pre-Maricá deste bloco ocorrem na forma de faixas lineares e alongadas segundo direção NE e infletem para NW na parte sul.

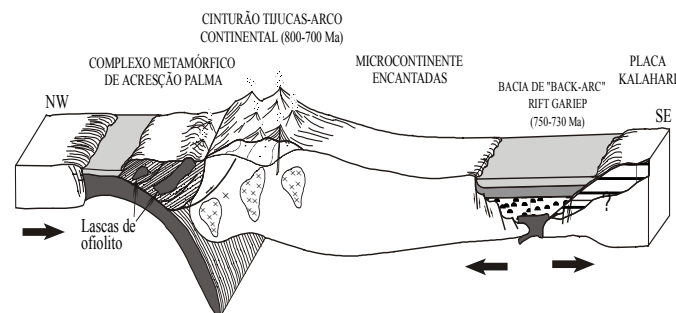
As lineações de estiramento com orientação NE e caimento subhorizontal predominam ao longo de todas as seqüências metamórficas do Bloco São Gabriel. O registro das lineações relacionadas ao episódio de empurrão está pouco preservado devido às movimentações direcionais ou horizontais relacionadas ao evento transcorrente mais jovem. A superposição da movimentação transcorrente sobre a deformação tangencial pode estar ligada ao mesmo evento evolutivo ou representar dois episódios distintos temporalmente. O quadro estrutural parece indicar, no entanto, eventos separados temporalmente. A idade do evento do cavalgamento situa-se entre 700-600 Ma. O limite superior é sugerido pela idade dos gnaisses Cambaí (Babinski *et al.*, 1996) e pela datação do metamorfismo nos andesitos (Remus, 1998) e o limite inferior corresponde à intrusão do Granito Lavras do Sul. O evento transcorrente está assinalado pela intrusão do Granito Caçapava do Sul há cerca de 562 Ma (Remus, 1998). O Bloco São Gabriel seria constituído por: Cinturão Passo Feio Norte e Sul e os Gnaisses Neto Rodrigues; Cinturão Bossoroça, constituído pelo Grupo Vacacaí (Formação Campestre e Formação Cerro do Ouro), no qual neste trabalho compõem as Seqüências Campestre e Lajeadozinho, respectivamente; Complexo Cambaí e Cinturão Cambaizinho.

Nesse trabalho será adotada a evolução geotectônica proposta por Chemale Jr., (Figura 2.5) onde o Complexo Bossoroça tem seu desenvolvimento nas Fases II e III, que corresponde às idades entre 800-650 Ma.

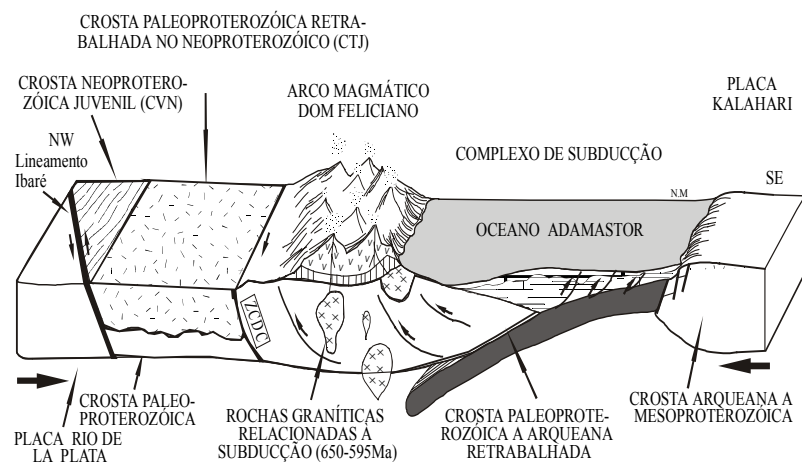
## FASE I (900-800 Ma)



## FASE II (800-700 Ma)



## FASE III (650-595 Ma)



## FASE IV (ca. 595-540 Ma)

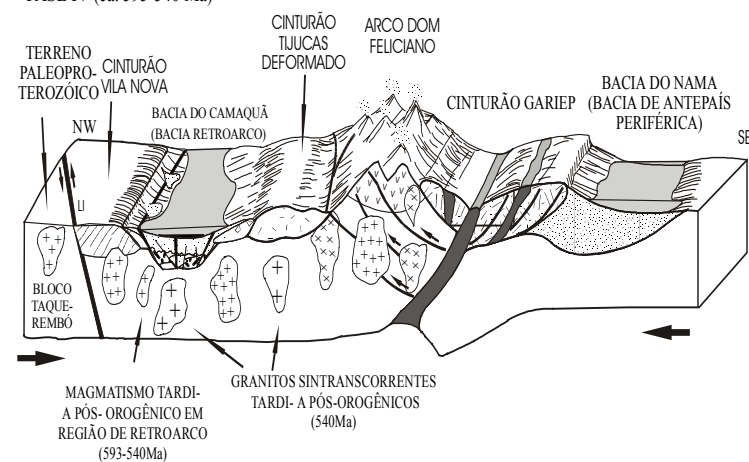


Figura 2.5. Mapa do processo evolutivo do Escudo Sul-rio-grandense, segundo Chemale Jr. (2000), onde o Complexo Bossoroca encontra-se vinculada ao Cinturão Vila Nova, a) fragmentação das placas Rio de La Plata e Kalahari (FASE I); b) processo de rifteamento da placa Kalahari com formação de uma margem ativa convergente a oeste e divergente ao leste (FASE II); c) geração do protoceano Adamastor, que entrou em processo de subducção em menos de 100 Ma (FASE III) e d) subducção do protoceano Adamastor com magmatismo tardi a pós – orogênico posterior (FASE IV).

## 2.5 Geocronologia

Soliani Jr. (2000) fez uma síntese das principais datações realizadas no Escudo Sul-riograndense, realizados desde o início da década de 70 até agora. As principais litologias datadas na área de estudo estão dispostos na Tabela 2.6.

Também foi verificado que terrenos pré-brasilianos expunham-se de forma contínua apenas na porção SW do Escudo e litologias de idades igualmente transamazônica eram encontradas de forma esparsa nos Cerro das Encantadas e na região de Mata Grande, interpretados como afloramentos do embasamento mais antigo. As demais áreas do Escudo revelaram ter evoluído nos tempos do Ciclo Brasileiro.

Naime (1987) obteve uma idade Rb-Sr convencional para o Granito Cerro da Cria e uma idade isocrônica Rb-Sr para o Granito Ramada. Silva Filho e Soliani Jr. (1987) com base em trabalhos anteriores sobre a evolução tectônica e a petroquímica dos Gnaisses Cambaí na região de Vila Nova, os quais resultaram no estabelecimento de uma seqüência temporal relativa de eventos deformacionais e na formação de determinadas estruturas com alguns processos ígneos, investigaram geocronologicamente algumas das diversas litologias componentes da unidade gnáissica em questão.

Machado *et al.* (1990) foram os primeiros autores a utilizarem o método U-Pb em zircões extraídos de riolitos da Seqüência Campestre (Complexo Bossoroca), obtendo uma idade brasileira para porção norte do Grupo Vacacaí na região de Vila Nova. Hartmann (2000) comenta que idades obtidas com precisão através do método U-Pb em zircão via SHRIMP estão disponíveis para Formação Campestre. Os valores obtidos indicam idade de cristalização de  $756 \pm 14$  Ma para os metadacitos da Formação Campestre e de cerca 700 Ma para o metamorfismo regional dinamotermal de baixa pressão que afetou esta unidade (Remus 1998).

Babinski *et al.* (1996) relacionaram cerca de duas dezenas de idades Sm/Nd para litologias diversas do leste e do oeste do Escudo Sul-riograndense, concluindo pelo domínio de refusões crustais na porção oriental e por evidências de magmas de derivação mantélica na porção ocidental do Escudo. As idades U-Pb, até então disponíveis seriam sugestivas de maior antiguidade para o Bloco São Gabriel, que se teria comportado como antepaís para o desenvolvimento da Orogênese Dom Feliciano.

Gastal e Lafon (1998) reúnem novos dados Rb-Sr e Pb-Pb para granitóides metaluminosos de afinidade alcalina na porção oeste do Escudo do Rio Grande do Sul.

Incluídos no que foi denominado de Suíte Intrusiva Saibro, os autores discutem os dados isotópicos do Granito Jaguari, do Complexo Intrusivo Lavras do Sul, do Monzodiorito Arroio do Jacques e do Granito São Sepé.

Hartmann *et al.* (2000) afirma que não existem dados geocronológicos para as rochas da Formação Cerro do Ouro (Seqüência Arroio Lajeado). Dados de Sm/Nd indicam uma idade de extração do manto do ciclo Brasileiro (Babinski *et al.* 1996). Dados de Sm/Nd mais recentes para as rochas da Formação Cerro do Ouro indicam idades modelo de extração do manto de cerca de 1,7 Ga (Tabela 2.6). Evidências geoquímicas e isotópicas coincidem na indicação da presença de septos do embasamento transamazônico na região.

Tabela 2.6 Geocronologia para as rochas do Complexo Bossoroca e litologias associadas.

Unidades/Métodos	Sm-Nd	U-Pb	K-Ar	Pb-Pb	Rb-Sr
Formação Passo Feio		2448±7 2100 870-820			
Gabro Mata Grande			2182 ± 10 1826 ± 55 1867 ± 56		
Complexo Pedras Pretas			1044 ± 55 839 ± 29 891 ± 79 515 ± 17		
Complexo Cambaí	2030, 800, 30, 800				714 ± 49 759 ± 326
Seqüência Campestre		753 ± 20 756 ± 14			
Seqüência Arroio Lajeado	1700		681 ± 44		
São Sepé	2300	559 ± 7 562 ± 7 542 ± 6	506 ± 22 468 ± 34	695 ± 19 1057 ± 122 525 ± 7 555 ± 31	669 ± 54 527 ± 7 466 ± 6
Cerro da Cria					564 ± 4
Formação Acampamento Velho					529 ± 4
Ramada			525 ± 3 464 ± 34		
Formação Rio Bonito			275-250		

## 2.6 Características da mineralização de ouro no Complexo Bossoroca

As mineralizações de Au no Complexo Bossoroca estão representadas por depósitos e ocorrências do tipo filonianos, caracterizados por associações de filões de quartzo com ouro e pequenas proporções de óxidos de ferro, pirita e calcopirita. Os filões apresentam direções NE e NW e encaixam-se concordantes ou não à estruturação geral das rochas da Seqüência Campestre. Alguns desses depósitos constituem minas ativas, enquanto outros foram objetos de exploração em regime de garimpagem no passado. Adicionalmente, são localmente explorados os depósitos secundários (colúvios e elúvios) derivados dos filões e dos metamorfitos encaixantes (Porcher *et al.*, 1995). As principais ocorrências auríferas da área de estudo estão dispostas na Figura 1.3, onde os principais depósitos da área são as minas Bossoroca, Cerrito do Ouro e Passo da Juliana, as duas primeiras com decretos de lavra outorgados, enquanto a última com atividade em regime de lavra experimental. Os demais depósitos cadastrados (Guardinha, Lavrinha, Viúva Guerra Duval e Estuque) foram objeto de alguma exploração no passado. A Tabela 1.3 (a) e (b) revela características das principais minas da região.

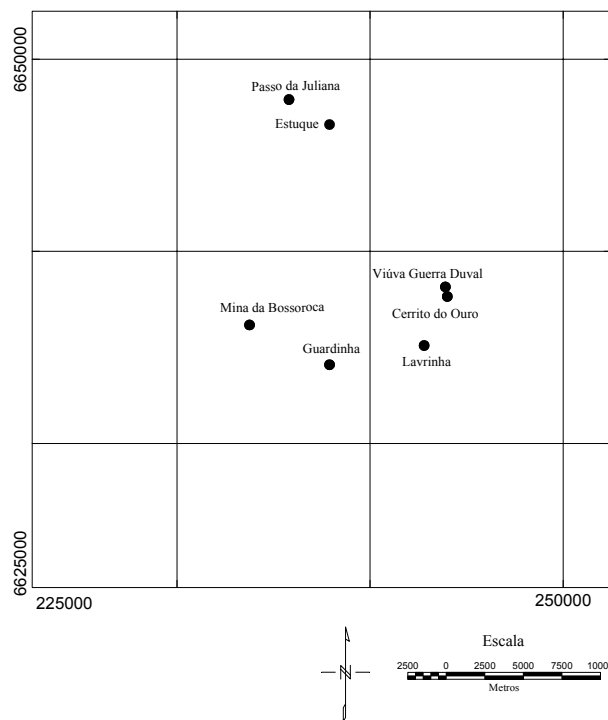


Figura 1.3. Mapa de localização das principais ocorrências auríferas da região do Complexo Bossoroca.

Esses depósitos filonianos, como os demais que constituem o Distrito Aurífero do Rio Grande do Sul, são conhecidas de longa data. No início desse século, diversas companhias, nacionais e estrangeiras, atuaram nessas áreas, mas as atividades de exploração foram encerradas a partir de 1945. Na década de 1980, com a revalorização do ouro no mercado internacional, foram retomadas as atividades de pesquisa e exploração em vários desses depósitos.

Tabela 1.3. (a) e (b). As principais ocorrências auríferas da região do Complexo Bossoroça e suas características como (a) possança, extensão, atitude e as principais litologias e (b) reserva e teor médio.

(a)

Mina/Característica	Extensão (m)	Possança (m)	Atitude (graus)	Principais litologias
Cerrito do Ouro	100 (P)	5-7(P); 0,6-0,8(S)	N17°W/65°SW (P)	Clorita xistos e sericita xistos
	125 (S)		N-S/80°W (S)	
	130 (S)		W/80°S (S)	
Bossoroça	350	0,35	N45°E/30°SE	Vulcânicas ácidas e intermediárias (tufos)
Estuque		40*	N45°E N65°E	Granulação média a fina do Granito São Sepé
Passo da Juliana		Pequena		Xistos cornubianitizados
Guardinha	80	0.5-2	N45°E	Metadiorito e metatufos

\* valor estimado

(b)

Mina/ Característica	Reserva (t)	Teor médio (g/t)
Cerrito do Ouro	202.000	5.65
Bossoroça	7.800	10-15
Passo da Juliana	1.000.000	0.203
Guardinha	72.350	1.05

# Capítulo 3

## Técnicas Geofísicas Aplicadas

Este capítulo apresenta algumas considerações sobre os métodos gamaespectrométricos e magnéticos e suas principais aplicações na exploração mineral aurífera. São abordadas as principais características físicas e químicas dos radioelementos bem como a sua distribuição nas rochas e solos e seus efeitos na exploração de minérios. Também são revisadas as características magnéticas, desde os conceitos básicos, passando pelas propriedades do aerolevante, até os principais modelos geofísicos voltados à exploração de ouro, discutindo as principais técnicas de processamento aeromagnético utilizado nessa caracterização.

### 3.1. Gamaespectrometria

A análise de radioelementos por espectrometria dos raios gama foi desenvolvida principalmente por técnicas praticadas em laboratório no século passado, na década de 1950.

A pesquisa aerogamaespectrométrica, neste trabalho, não será considerada apenas como uma ferramenta para auxiliar na interpretação geológica da área, mas também, como uma utilização para interpretação dos processos geoquímicos que atuaram nas seqüências Campestre e Arroio Lajeado e suas relações com as ocorrências auríferas da área. Dessa



maneira, devemos tecer algumas considerações a respeito do comportamento geoquímico dos radioelementos, bem como os efeitos nas rochas e no solo, e o efeito da distribuição dos radioelementos nos principais modelos geológicos para exploração mineral. Para uma interpretação efetiva necessita-se conhecer as condições da série de decaimento do urânio e das propriedades químicas do potássio (K), urânio (U) e tório (Th) no ambiente natural.

### 3.1.1. Radioatividade

Radioatividade é a desintegração espontânea de núcleos atômicos mediante a emissão de partículas subatômicas chamadas partículas *alfa* e partículas *beta* e de radiações eletromagnéticas denominadas raios X e raios *gama*. O fenômeno foi descoberto em 1896 por Antoine Henri Becquerel. Logo se reconheceu que a radioatividade era uma fonte de energia mais potente que nenhuma outra até então usada.

Ernest Rutherford descobriu que as emissões radioativas contêm, ao menos, dois componentes: partículas *alfa*, que só penetram alguns milésimos de centímetro no alumínio, e partículas *beta*, que são quase 100 vezes mais penetrantes. Mais tarde, concluiu-se que existia mais um componente, os raios *gama*, muito mais penetrantes que as partículas *beta* (Figura 3.1).

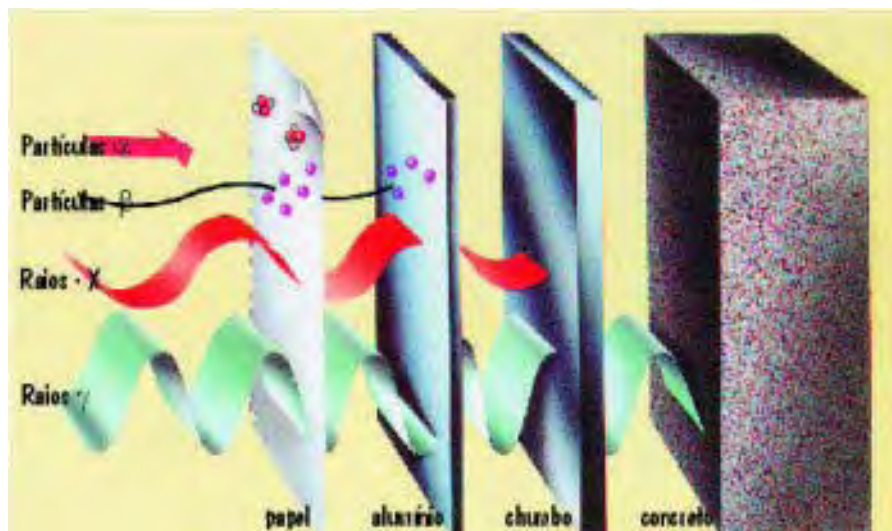


Figura 3.1. Poder de penetração das partículas radioativas ([http://www.ipen.br/n/nr/nr\\_portugues/pag07.htm](http://www.ipen.br/n/nr/nr_portugues/pag07.htm)).

As partículas *alfa* são íons de hélio com carga dobrada. As partículas *beta* são elétrons, enquanto que os raios *gama* são radiações eletromagnéticas da mesma natureza que os raios X, mas com uma energia consideravelmente maior.

As partículas *alfa* e *beta* são unidades discretas de matéria, razão pela qual, na radioatividade, os átomos se transformam (mediante a emissão de uma dessas partículas) em novos elementos, com propriedades químicas novas (Tabela 3.1). Quando um núcleo perde uma partícula *alfa*, forma-se um novo núcleo, mais leve que o original em quatro unidades de massa. A emissão *beta* se produz por meio da transformação de um nêutron em um próton, o que acarreta um aumento da carga nuclear (ou número atômico) em uma unidade. Os raios *gama* costumam estar associados às emissões *alfa* e *beta*. Não têm carga, nem massa; portanto, a emissão de raios *gama* por parte de um núcleo não causa mudanças na estrutura do núcleo, mas simplesmente uma perda de determinada quantidade de energia radiante.

Tabela 3.1. Tabela ressaltando as principais características das partículas *alfa* e *beta*.

Partículas/Raios	Velocidade	Fluorescência	Carga	Ionização de gases
Alfa	1,4 – 2,2 $10^9$ cm/s	Em alguns elementos	Positiva de hélio (+2)	Ionizantes
Beta	0,99c*	brilhante	Negativas	Pouco ionizantes

\* $c = 3 \times 10^{10}$  cm/s – velocidade da luz

### 3.1.2. Raios *Gama*

Em muitos núcleos o decaimento através de partículas *alfa* e *beta* é seguido de emissão de energia em forma de uma onda eletromagnética. Esta onda é chamada de radiação *gama* ( $\gamma$ ) e se origina de uma instabilidade energética surgida no núcleo após a emissão das partículas *alfa* e *beta*. São *quantas* ou fótons de energia que são muito penetrativos, pois não possuem massa e nem carga elétrica (Tabela 3.2). Os raios *gama* podem penetrar até 30 centímetros na rocha e diversos metros no ar, nos quais são a única escolha para os sensores remotos terrestres que captam radioatividade. Cada fóton de raios *gama* tem uma energia discreta e sua energia é característica de um isótopo fonte e isto forma a base da pesquisa em espectrometria de raios *gama*, de acordo com Minty (1997).

Tabela 3.2. Principais características dos raios gama.

Raios Gama	Velocidade	Frequência	Carga	Comprimento de onda
Características	Luz	$3 \times 10^{19} - 3 \times 10^{21}$ Hz	Não possui	$1,7 \times 10^{-10} - 4,1 \times 10^{-8}$ cm
Interesse geológico*		$3 \times 10^{19}$ Hz		$3 \times 10^{-12}$ cm

\*numa faixa de energia correspondente a 0,2 – 0,3 MeV

### 3.1.3. Decaimento radioativo

Quando o núcleo de um átomo emite uma partícula *alfa*, uma partícula *beta*, um raio gama, ou então quando captura um elétron da camada extranuclear, o processo é chamado de decaimento radioativo (Arya, 1966).

A lei de decaimento radioativo é um fenômeno estatístico resultante de um grande número de eventos, sujeitos à lei da probabilidade (Kaplan, 1978). Para descrever o comportamento estatístico da radioatividade, deve-se assumir que cada núcleo tem uma probabilidade ( $\lambda$ ) de decair no próximo segundo (considerando que  $\lambda \ll 1$ ). Esta probabilidade  $\lambda$ , que representa a constante de decaimento, é característica de cada espécie radioativa e é independente do tempo, do número e do tipo do núcleo. Também não varia de acordo com as condições do meio (temperatura, pressão, combinação química). No tempo  $dt$ , a probabilidade de decaimento de cada átomo será portanto,  $\lambda dt$ . Considerando  $N$  átomos não decaídos em um dado tempo, o número  $dN$  que decairá num curto intervalo de tempo  $dt$  é dado por:

- $dN = -\lambda dt N$  ou  $dN/N = -\lambda dt$

Esta equação mostra que o número de decaimento no tempo,  $dt$ , é proporcional ao número inicial de átomos ( $N$ ) e ao intervalo de tempo  $dt$ . O sinal negativo significa que  $N$  decresce quando  $t$  cresce.

Assumindo-se que no instante  $t = 0$  o número de átomos radioativos presentes é  $N_0$ , e integrando-se a equação anterior, têm-se o número de átomos radioativos presentes em um tempo  $t$ , o qual pode ser representado pela seguinte equação:

- $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ , onde  $N$  = número de átomos presentes no tempo  $t$ ;  $N_0$  = número de átomos presentes no tempo  $t = 0$ ;

$\lambda$  = constante de desintegração ou constante de decaimento.

Uma grandeza de importância no estudo da radioatividade é a meia-vida. Também representada por  $t_{1/2}$  ou  $N$ , esta variável é definida como o intervalo de tempo necessário para que uma amostra se reduza a metade da quantidade inicial. Fazendo-se  $N = N_0/2$ , para um tempo  $t = t_{1/2}$  e substituindo-se na equação

- $N = N_0 e^{-\lambda t}$ , obtém-se:
- $t_{1/2} = 1/\lambda \times \ln 2 = 0,693/\lambda$

## 3.2. Geoquímica dos radioelementos

O urânio, tório e potássio são os principais radioelementos contribuintes da radioatividade natural das rochas. Todos eles são litófilos e estão concentrados preferencialmente nas rochas ígneas ácidas (Vasconcellos *et al.*, 1994).

### 3.2.1. Potássio

O potássio (K) é um dos principais componentes da crosta da Terra (2.35%). Ele é um álcali e mostra uma química simples. Os principais minerais a base de potássio são os feldspatos potássicos (principalmente ortoclásio e microclínio com aproximadamente 13% de K) e micas (biotita e muscovita com 8% de K, aproximadamente) e, conseqüentemente, apresentam teores altos em rochas ácidas (granitos, sienogranitos, leucogranitos, etc.) e baixos em rochas máficas (dunitos, peridotitos, etc). O comportamento dos minerais a base de K frente ao intemperismo determina o conteúdo de radioelementos nas rochas intemperizadas e solos. Durante o intemperismo, os minerais potássicos serão destruídos na ordem biotita – K-feldspato – muscovita. O potássio é liberado durante o intemperismo e forma minerais como illita, podendo ser adsorvidos em menores quantidades dentro de argilas, como por exemplo, em montmorilonitas (Dickson e Scott, 1997).

O potássio é detectado numa pesquisa gamaespectrométrica pela emissão dos raios gama emitido na faixa 1,46 MeV pelo decaimento do  $^{40}\text{K}$ . Esse isótopo constitui 0,02% do K natural e é, portanto, uma medida direta do conteúdo de K no terreno.

### 3.2.2. Urânio ( $^{238}\text{U}$ )

O urânio (U) é um dos componentes menores da crosta da Terra (aproximadamente 3 ppm). Sua química é dominada por dois estados de valência  $\text{U}^{+6}$  e  $\text{U}^{+4}$ . A forma mais reduzida,  $\text{U}^{+4}$ , está geralmente contida em minerais insolúveis, ao contrário da forma mais oxidada,  $\text{U}^{+6}$ , onde em associação com complexos de  $\text{CO}_3^{-2}$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$  e  $\text{PO}_4^{-3}$ , podem formar muitos minerais solúveis. A mobilidade do  $\text{U}^{+6}$  é modificada pela adsorção de óxidos de ferro hidratados, argilas e colóides e pela redução de minerais à base de  $\text{U}^{+4}$  insolúveis quando ambientes redutores encontram água.

O urânio pode estar presente nas rochas tanto em minerais à base de óxido como em silicatos, como por exemplo, uraninita e uranotorita, em minerais com U primário, como em monazita, xenotímio e zircão; como em quantidades traço em outros minerais, ou ao longo de limites de grãos, possivelmente em óxidos e silicatos. O urânio liberado pela quebra de minerais durante o intemperismo pode ser retido em óxidos de ferro autigênicos e argilominerais ou precipitado sob condições redutoras, formando depósitos de urânio em condições favoráveis. O urânio por si só não emite radiação gama durante seu decaimento e o mais energético raios gama emitido pelo isótopo filho vem do bismuto ( $^{214}\text{Bi}$ ) (Dickson e Scott, 1997), portanto denominado de equivalente ao urânio (eU).

### 3.2.3. Tório ( $^{232}\text{Th}$ )

Tório (Th) é um componente menor da crosta da Terra (aproximadamente 12%), ocorrendo nos estados de valência  $\text{Th}^{+4}$  e  $\text{Th}^{+3}$ , sendo este raro na natureza e instável em ambiente aquoso (Boyle, 1982). A solubilidade dos complexos de tório é geralmente baixa exceto em soluções ácidas. Entretanto, compostos orgânicos podem auxiliar na solubilidade do tório em condições de pH neutro.

Segundo Dickson e Scott (1997), o tório pode estar presente em alanita, monazita, xenotímio e zircão a níveis  $> 1000$  ppm ou em quantidades traço nos minerais principais. Os principais minerais de tório primário (monazita e zircão) são estáveis durante o intemperismo e podem acumular em minerais pesados em depósitos de areia. O tório liberado pela quebra de minerais durante o intemperismo pode ser retido em minerais hidratados ou oxidados a base de Fe ou Ti e com argilas. Tal como o U, o tório pode também ser transportado adsorvido em argilas coloidais e óxidos de ferro.

Devido à semelhança química do tório com elementos como o zircônio, háfnio, e certos elementos de terras raras, especialmente o cério (Boyle, 1982), os minerais formados por esses elementos, são passíveis de conter Th através de substituições iônicas. Assim, são freqüentes as seguintes trocas: de Zr por Th, em minerais de zircão; Y,Ce, e outros lantanídeos por Th na maioria dos minerais de terras raras; U por Th em certos minerais de urânio como resultado da similaridade dos raios iônicos. Presos em minerais de torianita e torita, ou pela substituição iônica de elementos quimicamente semelhantes, ou ainda fixados pela adsorção em complexos coloidais argilosos e em óxidos/hidróxidos de ferro, o tório tetravalente só é transportado, quando os colóides são incorporados à solução do solo ou, ainda, se os mesmos sofrerem uma mobilização biológica.

Como o urânio, o tório não emite radiação gama durante seu decaimento que termina no isótopo estável  $^{208}\text{Pb}$ . O isótopo mais energético emitido pelo isótopo filho vem do tálio  $^{208}\text{Tl}$  (Dickson e Scott, 1997), portanto denominado de equivalente ao tório (eTh).

### **3.3. Distribuição dos radioelementos nas rochas**

Dickson e Scott (1997), utilizando medidas de radioatividade de K, U ( $\text{Ra}^{226}$ ) e Th ( $\text{Ra}^{228}$ ) em solos e rochas na Austrália, em laboratório, verificaram que há um aumento no conteúdo dos radioelementos com relativo aumento no conteúdo de sílica em rochas ígneas, como por exemplo, rochas ácidas têm maior conteúdo de radioelementos do que rochas máficas a ultramáficas. A Figura 3.2 sumariza o conteúdo de sílica com a média no conteúdo dos radioelementos para as rochas australianas. De acordo com a Tabela 3.3, andesitos de baixo-K, vulcânicas intermediárias e vulcânicas ácidas tem um relativo aumento no conteúdo de tório e baixos valores para urânio e potássio, ao passo que vulcânicas ultramáficas, vulcânicas máficas e intrusivas máficas têm baixos conteúdos de elementos radioativos, mas com relativo aumento no conteúdo de tório.

Os dados disponíveis para rochas metamórficas sugerem que, dependendo de qual protólito originou-se a rocha, o metamorfismo não afeta o conteúdo dos radioelementos. Rochas sedimentares geralmente refletem o conteúdo de radioelementos da rocha fonte. Em sedimentos imaturos derivados de rochas graníticas pode-se esperar um aumento no seu conteúdo, mas em sedimentos imaturos ricos em quartzo, pode-se esperar baixos valores.

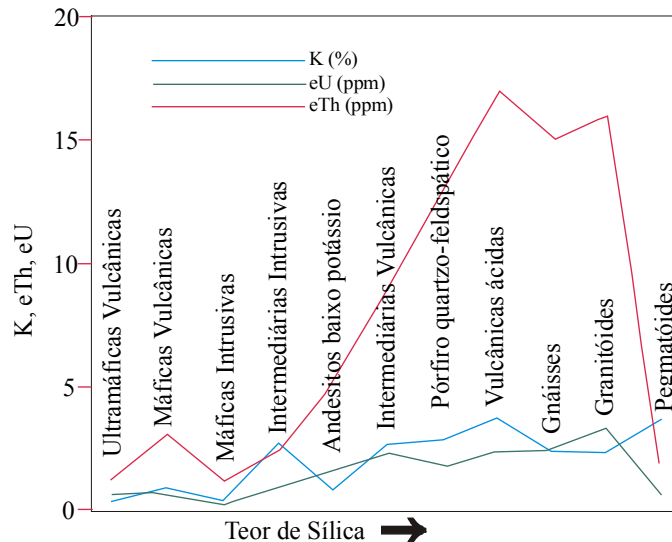


Figura 3.2. Variação na média do conteúdo de K, eTh, eU para rochas ígneas intrusivas e extrusivas com aumento no conteúdo de sílica. Modificado de Dickson ; Scott (1997).

Vasconcellos *et al.* (1994), enfatiza a abundância dos radioelementos nos principais litotipos ígneos ultramáficos a ácidos. Segundo o autor, os níveis radioativos das rochas ígneas podem estar correlacionados a alguns fatores tais como:

- teor de sílica;
- idade relativa numa série consangüínea;
- posição dentro de um único *pluton*.

A radioatividade das rochas ígneas, devida ao urânio e tório, provém de três fontes:

- minerais acessórios moderadamente radioativos;
- minerais essenciais fracamente radioativos;
- material radioativo localizado entre os grãos e em defeitos estruturais de minerais.

### 3.4. Distribuição dos radioelementos nos solos

Efeitos como misturas de solos, tempestades, vegetação coberturas não radioativas, intemperismo e movimentos de fontes aéreas em baixa atmosfera, podem prejudicar na interpretação dos dados aeroaerogamaespectrométricos.

Vasconcellos *et al.* (1994) salientam que as coberturas de solos geralmente têm forte efeito supressivo na intensidade da radiação dos raios gama. Portanto, ainda que a concentração relativa dos radioelementos nos solos permaneça praticamente a mesma que nas

rochas fontes, ocorrerá à diminuição da radioatividade devido à cobertura de solo, e como resultado disto, as rochas podem apresentar uma radioatividade menor, dando a impressão de serem mais máficas do que são.

Wildford *et al.* (1997) utilizaram pesquisa aerorradiométrica para estudar os efeitos dos radioelementos nos solos e regolitos australianos. Eles identificaram que água e mistura de solos podem atenuar os efeitos da radiação gama, bem como a vegetação, dependendo da densidade da cobertura. As respostas da radiação gama *in-situ* de regolitos intemperizados podem ser agrupadas de acordo com o tipo de rocha inicialmente intemperizada.

Regolitos associados com rochas metamórficas podem refletir heterogeneidade litológica das rochas e solos com relevos médios a altos (> 30 metros). A resposta da radiação gama em materiais parcialmente intemperizadas é essencialmente equivalente à resposta da rocha fonte. No entanto, a resposta da radiação gama sobre esses solos está diretamente relacionada à geoquímica da rocha. Regolitos associados às rochas graníticas australianas possuem uma resposta de radiação gama que reflete a composição química e a mineralogia dos granitos recobertos. Granitos do tipo-S geralmente reflete valores maiores em K e Th do que solos produzidos em granitos do tipo-I.

Wildford *et al.* (1997) também utilizaram mapas ternários dos elementos com pseudocoloração RGB, onde K no vermelho, eTh no verde e eU no azul, auxiliaram na correlação geoquímica dos estudos de solos e regolitos nas áreas de Ebagoola, Wagga Wagga e Sir Samuel nas áreas norte, sul e oeste da Austrália, respectivamente. A resposta aerogamaespectrométrica foi agrupada de acordo com o tipo de rocha inicialmente intemperizadas. Onde rochas ou solo/regolito são finos, a resposta dos raios gama está diretamente relacionada aos minerais primários das rochas e a sua geoquímica, e subordinadamente minerais associados com mineralizações (como por exemplo, alteração potássica).

Dickson e Scott (1997) discutem os principais efeitos do intemperismo nas rochas vulcânicas ácidas e máficas e sua relação com o conteúdo dos radioelementos. O intemperismo em vulcânicas ácidas geralmente produz solos com perdas nos três radioelementos. Solos sobre vulcânicas intermediárias (incluindo andesitos de baixo-K), produzem reduções no conteúdo de potássio radioativo, mas similares valores nos conteúdos de urânio e tório de suas rochas fontes.

Estudos sobre o teor de radioelementos em rochas vulcânicas máficas mostraram algumas mudanças notáveis. Estudos em rochas basálticas intemperizadas do Ordoviciano, do Terciário e do Recente, mostram solos com perdas de potássio mas ganho em urânio e tório,



que pode refletir a perda de potássio de vidro vulcânico intemperizado e a incorporação e concentração de urânio e tório dentro de óxidos de ferro durante a pedogênese. A Figura 3.3 mostra a variação na concentração de K, eTh, eU durante o intemperismo do basalto.

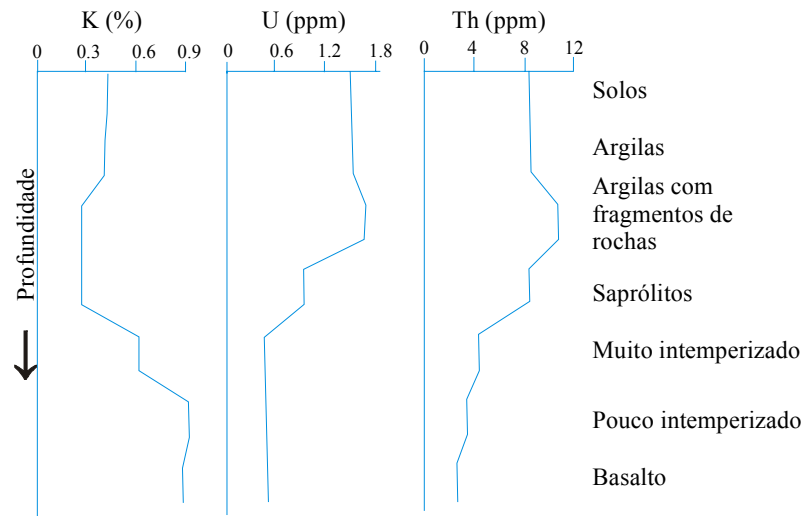


Figura 3.3. Variação no conteúdo das concentrações de K, U e Th durante o intemperismo do basalto, modificado de Dickson ; Scott (1997).

A remoção de potássio e a concentração de urânio e tório podem resultar em solos com assinaturas em radioelementos similares aos granitos intemperizados. A Tabela 3.3 mostra o conteúdo dos radioelementos nos solos e rochas extrusivas e nos granitóides da Austrália onde podemos verificar que as vulcânicas ácidas perdem geralmente de 20-30% de seu conteúdo em radioelementos, assim como nos granitóides.

Tabela 3.3. Conteúdo dos radioelementos em rochas e solos de rochas intrusivas e extrusivas australianas, modificado de Dickson ; Scott (1997).

Tipo de rocha	Rochas			Solos		
	K(%)	U(ppm)	Th(ppm)	K(%)	U(ppm)	Th(ppm)
Vulcânicas ácidas	2.0-4.4 (3.7)	1.4-13 (2.4)	13-28 (17)	1.8-3.2 (2.4)	1.3-2.4 (2.1)	10-18 (13)
Vulcânicas intermediárias	1.8-4.1 (2.7)	0.9-5.6 (2.3)	1.5-15 (9)	1.0-2.7 (1.9)	1.2-3.6 (2.1)	4-17 (10)
Andesitos de baixo-K	0.7-0.9 (0.8)	1.0-2.5 (1.6)	3-8 (5)	0.8-1.5 (1.1)	1.2-1.5 (1.3)	4-6 (5)
Vulcânicas máficas	0.3-1.3 (0.9)	0.3-1.3 (0.7)	2.0-5.0 (3.0)	0.2-1.4 (0.7)	0.6-2.5 (1.6)	3.3-13 (7.9)
Granitóides	0.3-4.5 (2.4)	0.4-7.8 (3.3)	2.3-45 (16)	0.4-3.9 (2.1)	0.5-7.8 (2.7)	2-37 (13)

### 3.5. Efeito na distribuição dos radioelementos na exploração mineral

O uso da pesquisa de espectrometria de raios gama, de acordo com Shives e Charbonneau (1997), é para determinar concentrações do elemento potássio, independente da espécie mineral em que o mesmo estiver associado, o qual habilita o mapeamento de alterações em uma ampla variação de ambientes geológicos. Por exemplo, alteração potássica para formar sericita está comumente associada a metais bases e depósitos de ouro em sulfetos. A alteração do K-feldspato foi documentada como um produto de alteração hidrotermal em vulcânicas associadas em depósitos de metais base no distrito de Bergelagen, Suécia, e nas vulcânicas em Mount Read, Tasmânia e nos depósitos de sulfetos maciços em Que River, Tasmânia. Alteração potássica é comum em cisalhamentos que hospedam depósitos de ouro, como aqueles em Hemlo e Red Lake, Ontário e muitos outros tipos de depósitos, como os listados em Hoover e Pierce (1990).

A pesquisa aerogamaespectrométrica requer no mínimo quatro mapas principais (contagem total, potássio, equivalente urânio e equivalente tório) para apresentar a variação primária medida. Importantes informações adicionais são obtidas com mapas derivados dos quatro principais, tais como, razões  $eU/eTh$ ,  $eU/K$ ,  $eTh/K$ , ternários K-eTh-eU, das razões  $eU/eTh$ ,  $eU/K$ ,  $eTh/K$ , Parâmetro F, K(Th) e U(Th).

Diversos autores discutem a distribuição dos radioelementos nos principais modelos de exploração mineral para pesquisa de metais como ouro, chumbo, zinco cobre, etc. Dentre eles podemos destacar Dickson e Scott (1997), Grebenchicov (1977), Ostrovskiy (1973), Irvine ; Smith (1990), Bennet (1971), Davis e Gilbert (1973), Moxham *et al* (1965), Gnojek ; Prichystal (1985) e Pires (1995).

Como exemplo, podemos citar Dickson e Scott (1997) que, em pesquisa no depósito de ouro epitermal em Bimurra, a nordeste de Queensland, Austrália, mostraram que a principal variação ocorre nos conteúdos de K e eTh nas rochas da área. Alteração fílica e propilítica pervasiva resulta num leve decréscimo em K, sem afetar os conteúdos de eU e eTh em tufos mais antigos (Figura 3.4). O efeito da silicificação relacionado à alteração hidrotermal depende da extensão da silicificação. Baixos teores na silicificação resultam no decréscimo de K e na retenção de eTh, ao passo que silicificação maciça resulta na completa perda de todos os três elementos. As razões K/eTh e K/eU podem ser usadas para identificação de zonas de alteração potássica, refletindo o aumento de K e o decréscimo de eU ou eTh, mas a interpretação dependerá do comportamento geológico da área.

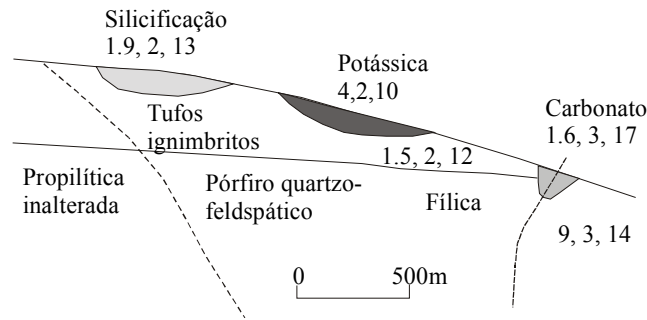


Figura 3.4. Sumário dos teores (na ordem) de K, eU e eTh dentro e ao redor da mina de ouro em Bimurra, na Austrália, modificado de Dickson ; Scott (1997).

Irvine e Smith (1990), em estudos de exploração geofísica para depósitos de ouro epitermal, ressaltam que embora a espessura da vegetação e solos saturados em áreas de alto volume de chuvas, espera-se uma redução da taxa de conteúdo de raios-gama, mas com técnicas apropriadas o método pode ser efetivo em áreas tropicais. As proporções relativas de K, Th e U são úteis para diferenciar litologias e na discriminação de rochas ricas em potássio e zonas de alteração metassomática a base de potássio. Técnicas de processamento de imagens, como por exemplo, mapas ternários (potássio = vermelho, tório = verde e urânio = azul) e razões de potássio com os outros canais (como, por exemplo, K/Th) são ferramentas poderosas para esta proposição. Ou a combinação de dois canais radiométricos e um magnético (como por exemplo, potássio = vermelho, tório = verde, magnéticos = azul) também podem ser instrutivos.

As características geoquímicas para o Complexo Bossoroca indicam baixos teores de potássio nas litologias vulcanoclásticas ácidas-intermediárias que compõem a Seqüência Campestre e a Seqüência Arroio Lajeado e baixos teores nas razões  $K_2O/Na_2O$ . A mineralização aurífera na Seqüência Campestre favoreceu a formação de halos de alteração hidrotermal, principalmente de silicificação, carbonatização e cloritização que promoveram forte dispersão dos dados químicos e de alterações hidrotermais e metamórficas, que provocaram modificações das características originais dos litotipos, afetando os elementos mais móveis como Na, K, Ca, Mg, Fe e Si. Desta forma, espera-se encontrar na região, com os parâmetros citados acima, halos hidrotermais com baixos teores de potássio associados a mineralização aurífera.

## 3.6 Aeromagnetometria

### 3.6.1 Introdução

Sir William Gilbert (1540-1603) foi o primeiro investigador científico do magnetismo terrestre que publicou um livro chamado *Magnete* no qual conhecia as propriedades da magnetita levada para Europa da China por Marco Pólo. Gilbert mostrou que o campo magnético da Terra era equivalente ao magneto permanente, numa direção geral norte-sul, próximo ao eixo rotacional da Terra.

A propriedade do campo magnético da Terra tem sido estudada desde o tempo de Gilbert, mas em 1843 foi que Von Wrede usou as variações do campo para localizar depósitos de minério magnético. Apenas com trabalho de Gilbert e Newton marcando o início da geofísica e a publicação do livro *The Examination of Iron Ore Deposits by Magnetic Measurements* por Thalén em 1879 que deu início à geofísica aplicada. A partir dessa publicação, e especialmente nos últimos anos, houve avanços na instrumentação e interpretação dessas medidas para a localização de minérios em subsuperfície e estruturas associadas com depósitos de óleo e gás.

A interpretação precisa de dados aeromagnéticos terrestres pode ser mais difícil do que a interpretação de dados de outras técnicas geofísicas, como a gravimetria, por exemplo. Por outro lado, as medidas do campo magnético são facilmente feitas, não requer muito dinheiro comparado com a maioria das técnicas, assim como correções na leitura são praticamente desnecessárias. Devido a isto e às variações do campo magnético serem muitas vezes diagnosticadas por estruturas minerais assim como estruturas regionais, características favoráveis para áreas petrolíferas e atualmente para prospecção mineira, o método magnético é, sem dúvida, um dos métodos mais versáteis da prospecção geofísica.

### 3.6.2 Campo geomagnético terrestre

O campo geomagnético terrestre comporta-se literalmente como uma esfera imantada, existindo variações na intensidade do campo magnético terrestre.

O campo magnético divide-se em três partes:

- O campo principal, cuja origem está relacionada à estrutura interna da Terra e apresenta apenas uma suave variação espacial;
- O campo externo, que representa uma pequena fração do campo geomagnético, tem origem externa e varia rapidamente de maneira parcialmente cíclica e aleatória;
- Variações do campo principal, relativamente constantes no tempo e no espaço, causadas por anomalias magnéticas próximas da superfície da crosta da Terra. Estas variações constituem os objetivos das prospecções magnéticas.

### 3.6.3 Elementos do campo magnético da Terra

Se uma agulha de aço, não previamente magnetizada, for pendurada por uma linha, estará livre para se orientar em qualquer direção no espaço, nos principais pontos da superfície da Terra, ela poderia assumir qualquer direção no plano do meridiano geográfico num dado ponto. A magnitude do campo  $F$ , a inclinação da agulha na horizontal  $I$  e a sua declinação  $D$  (ângulo que faz com norte geográfico), definem o campo magnético.

Em adição à  $F$ ,  $I$  e  $D$ , existe uma componente vertical  $Z$  inferior e positiva, uma componente horizontal  $H$  que é sempre positiva e  $X$ ,  $Y$  componentes de  $H$  considerado positivo ao norte e leste respectivamente.

O campo magnético da Terra é provavelmente causado pelo movimento de ferro parcialmente fundido na parte mais externa do núcleo terrestre, mais do que 2900 km abaixo da superfície terrestre.

### 3.6.4 Campo magnético externo

O campo externo – que corresponde 1% do campo magnético total – tem a sua origem fora do planeta, e poder estar associado com correntes elétricas nas camadas ionizadas acima da atmosfera. A variação no tempo é muito mais rápida do que o campo permanente. Diversos efeitos bem documentados estão listados abaixo.

- Um ciclo de duração de 11 anos, correlacionado com atividades solares, tem uma distribuição latitudinal (que indica uma origem externa);

- Variações diurnas solares, num período de 24 horas a variação pode ser de  $30\gamma$ , varia com latitude e estação do ano provavelmente controlada pela ação do sol nas correntes ionosféricas;
- Variações diurnas lunares, num período de 25 horas e amplitude de  $2\gamma$ . Varia ciclicamente dentro de um determinado mês e parece estar associado com a interação lua-ionosfera;
- Tempestades magnéticas são distúrbios ocasionados com amplitudes maiores do que  $1000\gamma$ , na maioria das latitudes, ainda maiores nos pólos, onde eles estão usualmente associados com a aurora. Embora erráticos, eles muitas vezes ocorrem em intervalos de 27 dias, no período ocasionado com atividades solares.

### 3.6.5 Variação do campo principal

Exceto por efeitos ocasionais de tempestades magnéticas, nenhuma das variações no campo magnético tem qualquer significado importante na prospecção magnética. Nem as variações de latitude de  $IF$  ou  $Z$ , requer correções dos dados de campo, exceto no caso de uma pesquisa em grande escala como em levantamentos aeromagnéticos empregados na exploração de petróleo, por exemplo.

Importantes mudanças ocorrem no campo principal como resultado das variações no conteúdo mineral magnético das rochas próximas à superfície. Estas anomalias são ocasionalmente amplas o suficiente para causar uma duplicação no campo magnético localmente.

### 3.6.6 Magnetômetro

De uma maneira geral, o magnetômetro consiste de um sensor preenchido com um hidrocarboneto líquido, que fica no alto de uma haste não magnética e uma unidade leitora. Quando acionado, o sensor gera um pulso magnético que força os núcleos do H (prótons) do hidrocarboneto se alinharem segundo este campo induzido. Quando o campo cessa, os núcleos de H voltam às suas posições originais alinhando-se segundo o campo magnético da Terra. O aparelho indica a vibração dos átomos ao se alinharem ao campo, fenômeno chamado de ressonância magnética, permitindo medir a intensidade do campo magnético total no local.

Os magnetômetros de precessão nuclear e de bombeamento ótico são os mais usados nos levantamentos aéreos. O primeiro, para medidas de campo total e o segundo, para medidas do gradiente do campo total. Estes dois tipos de sensores não necessitam ser alinhados com a direção do campo magnético durante as medidas, sendo essa uma das causas que os tornaram mais utilizados nos aerolevantamentos. Os principais sistemas de navegação empregados em aerolevantamentos são posicionamentos por mosaicos fotográficos, posicionamento eletrônico e navegação *Doppler*.

### 3.6.7 Anomalias magnéticas

Como exposto anteriormente, importantes mudanças ocorrem no campo principal como resultado das variações no conteúdo mineral magnético das rochas próximas à superfície. Os principais minerais magnéticos são magnetita, titanomagnetita, maghemita, pirrotita e ferro nativo ou ligas de Fe – Ni – Co. Estes minerais nos fornecem anomalias magnéticas devido às suas susceptibilidades magnéticas elevadas ou devido à sua alta magnetização remanescente. A magnetita é responsável por cerca de 99% das anomalias magnéticas e é um mineral acessório que está presente na maioria das rochas apenas em pequenas quantidades – raramente não ultrapassa 1% do total do volume da rocha.

O campo magnético da Terra provoca um campo secundário induzido nas rochas que contém mineral magnético. A intensidade desse campo secundário é proporcional à intensidade do campo geomagnético sendo a constante de proporcionalidade definida como susceptibilidade magnética:

$$T' = KT$$

Onde:  $T'$  – campo induzido;  $T$  – campo magnético;  $K$  – susceptibilidade magnética.

Algumas rochas e minerais também possuem, além da magnetização induzida, uma magnetização remanescente adquirida durante o período em que a rocha esteve exposta a um campo magnético diferente do atual. Essa magnetização remanescente pode ser mais intensa do que a magnetização induzida atual, influenciando proporcionalmente a magnetização resultante da soma vetorial das duas.

A interferência provocada no campo magnético principal pelas rochas da crosta terrestre produz perturbações locais que são caracterizadas por diferentes relevos magnéticos, em função da susceptibilidade magnética das rochas. Quanto maior a concentração de minerais magnéticos, associado à extensão, comprimento, profundidade, inclinação e latitude do corpo magnético, mais acentuado torna-se o relevo magnético. Assim, rochas

sedimentares (exceto formações ferríferas) apresentam relevos magnéticos suaves, enquanto rochas ígneas com magnetita produzem um relevo magnético acidentado nos mapas de contorno magnéticos. As rochas metamórficas podem apresentar relevos suaves, moderados ou acidentados, em função da origem das rochas e das alterações provocadas pelo processo metamórfico.

Corpos geológicos portadores de minerais magnéticos produzem anomalias no campo magnético cuja forma é função das seguintes variáveis:

- Orientação do corpo em relação ao campo magnético indutor;
- Forma e mergulho do corpo;
- Magnetização do corpo.

### **3.6.8 Avaliação do aerolevanteamento**

Muitas pesquisas magnéticas são feitas com plataforma aérea medindo-se a intensidade do campo magnético total. Para se ter um bom levantamento aeromagnético deve-se tomar algumas medidas necessárias para obter o máximo de informação das principais estruturas do terreno e assim pode-se realizar uma integração com outros dados, como por exemplo, geológicos e radiométricos. Segundo Nettleton (1971) o avião ou helicóptero é usualmente equipado com altímetro, sistemas de geoposicionamento, magnetômetro e outros instrumentos de vôo.

A elevação do vôo é normalmente de 50 a 450 metros acima da superfície e, onde há uma ampla variação topográfica, será necessário realizar o levantamento em duas ou mais partes a diferentes elevações constantes, geralmente com alguns sobrevôos nos limites comuns. Isto pode causar problemas com o efeito do gradiente vertical (Nettleton, 1971), causando um hiato nos contornos devido à diferença de elevação dos dois levantamentos. Um ótimo espaçamento da linha de vôo depende da profundidade do embasamento, porém é escolhida empiricamente, já que o embasamento é conhecido de uma forma geral ou muito pouco conhecido. Essa altura deve, entretanto ser escolhida segundo as dimensões do alvo de levantamento, por isso a altura de vôo pode variar desde 50 metros, se o alvo é de pequenas dimensões (corpos de minério), até cerca de 450 metros, se o alvo é de grandes dimensões (falhas e dobras regionais). As alturas de vôos maiores possibilitam que o efeito magnético das pequenas fontes de anomalia, que são indesejáveis quando se procuram fontes extensas, não seja incorporado às medidas.



Para pesquisa mineral, geralmente é obedecido um espaçamento de 1/4 da distância entre as linhas de vôo para geração das malhas. Em muitos casos, o levantamento é feito por helicóptero, pois traz observações próximas à superfície e permite velocidades mais baixas para poder gravar melhor as anomalias de fontes rasas, bem como padrões de contorno magnético próximo a outros corpos. Também podem ser usados para interpolar contatos sobre áreas recobertas.

A orientação das linhas de vôo deve ser perpendicular às principais estruturas geológicas, como por exemplo, direção e mergulho das camadas, lineamentos e *trends* estruturais e/ou magnéticos. As linhas devem ser paralelas e controladas sempre por linhas de vôos perpendiculares num intervalo de tempo geralmente maiores do que as linhas de vôo principais. As linhas de pesquisa e as linhas de controle formam *loops* próximos no qual mudanças magnéticas podem ser ajustadas para poder eliminar efeitos da variação diurna ou problemas relacionados ao instrumento.

A configuração de vôo amplamente usada consiste de linhas paralelas, com as linhas adjacentes voadas sempre em sentidos opostos e linhas de controle, transversais às anteriores, voadas periodicamente.

### **3.6.9 Correções nos levantamentos magnetométricos**

A leitura no magnetômetro é afetada pelo somatório de todas as contribuições do campo magnético no tempo e local de observação e que, após a sua coleta, passam por um processo de tratamento que inclui as correções para eliminar as variações devidas às causas não geológicas, como a variação diurna e filtragem para eliminar efeitos geológicos indesejáveis, como produzidos por heterogeneidades próximas da superfície ou a interferência entre fontes rasas e profundas. O processo remove as variações de dados não geológicos de cada linha causadas pelo vôo inexato, variação diurna do campo magnético da terra e outras causas.

Para eliminar os efeitos da variação diurna nos aerolevantamentos um magnetômetro é comumente deixado fixo, em terra, registrando continuamente ou a intervalos regulares. Como em geral, as áreas aerolevantadas são muito extensas, é possível que uma única estação base não forneça medidas satisfatórias para correção diurna, tornando-se de difícil implementação logística. A correção é feita, no entanto, a partir de retângulos fornecidos pelas linhas de vôo e as linhas de controle, onde a mudança de tempo dentro deste período é

geralmente pequena, podendo ser removido. Outras correções principais dos dados aeromagnéticos serão relatadas no capítulo de processamento.

### **3.6.10 Assinaturas magnéticas de feições geológicas**

Anomalias magnéticas podem ser produzidas por uma série de feições como mudanças litológicas, variação na espessura de unidades magnéticas, falhamentos, dobramentos e relevo topográfico. Uma quantidade significativa de informações pode ser obtida da análise qualitativa de mapas de anomalias do campo magnético residual e regional. O mapa aeromagnético, quando interpretado, fornece informações básicas sobre as propriedades geofísicas das rochas, no qual pode auxiliar na interpretação geológica. Mapas interpretados mostram unidades magnéticas e não-magnéticas dobras e falhas que afetam certas rochas e intrusões ígneas metamórficas e sedimentares.

Para um corpo particular, a inclinação do campo magnético, direção e mergulho do corpo, mudarão a forma da anomalia magnética e para interpretar devem ter uma imagem mental para se poder relacionar as anomalias às rochas. A Figura 3.5 mostra alguns padrões anômalos associados às feições geológicas.

Vasconcellos *et al.* (1994) aponta as principais maneiras de se interpretar alinhamentos magnéticos, geralmente indicativos de contatos litológicos e/ou fraturamentos, considerando as seguintes características, principalmente em mapas de contorno:

- Interrupção de altos magnéticos;
- Interrupção de baixos magnéticos;
- Mudança de gradiente;
- Padrões de contorno em linhas retas.

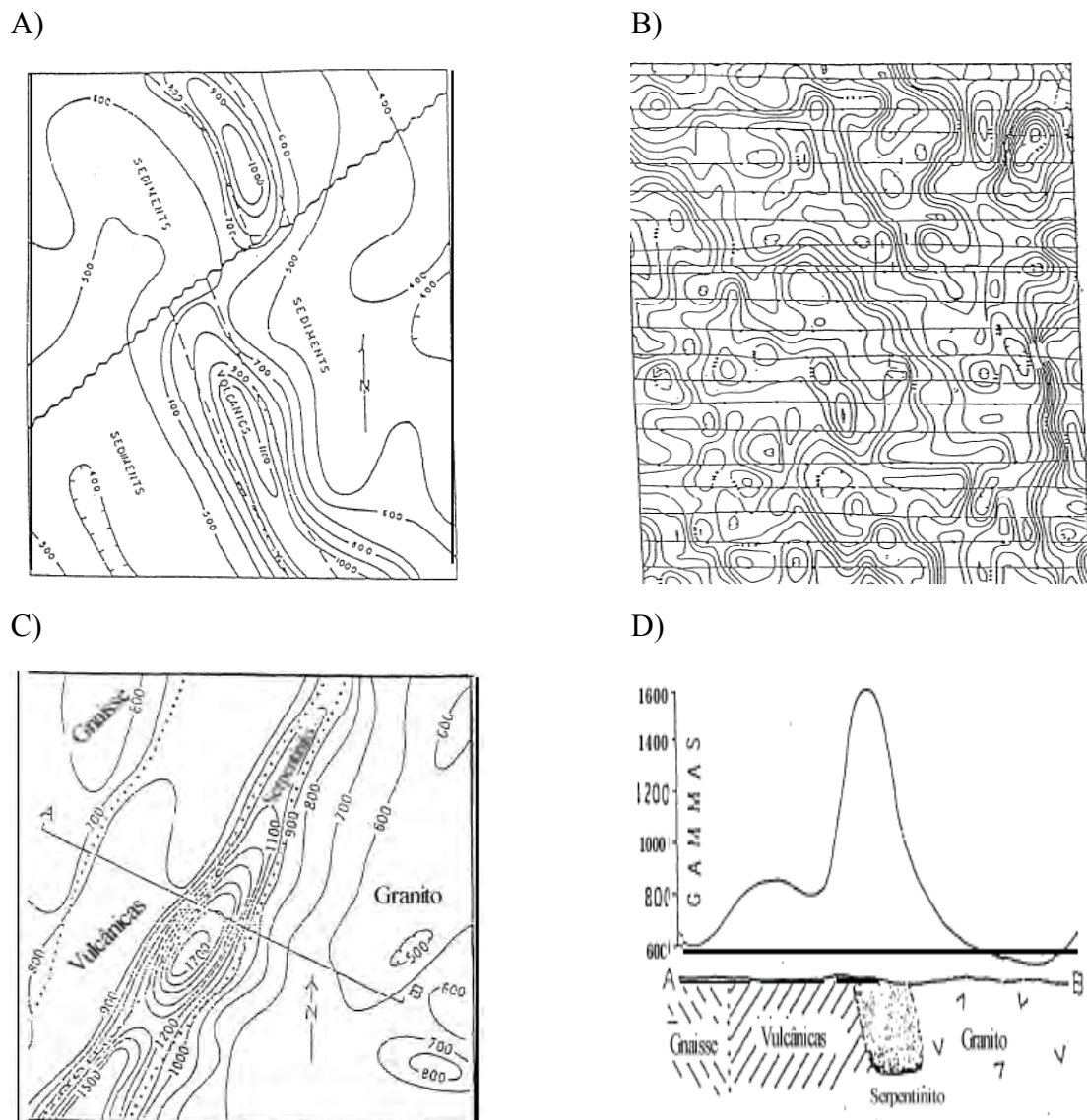


Figura 3.5. Anomalias de feições geológicas. A) falhamentos em rochas recobertas. O deslocamento abrupto do contorno magnético é indicativo de uma falha. B) uma área de relevo com baixo magnético com o sentido da direção vagamente definido. Isto é típico de expressão magnética de um terreno granítico ou gnáissico. Se este padrão for intensificado, poderia facilmente representar uma assinatura do tipo Greenstone. C) peridotito serpentinizado, plano e perfil D) mostrando o campo magnético sobre um *sill* peridotítico serpentinizado em Newfoundland, Canadá. Modificado de Camille ; Potvin (1998).

### 3.6.11 Exploração aeromagnética em modelos de depósitos minerais auríferos

Na exploração aurífera é necessário o conhecimento dos principais modelos de depósitos minerais para que se caracterize uma região favorável para a pesquisa. A pesquisa aeromagnetométrica auxilia na identificação de certas características e feições geológicas, através de minerais magnéticos presentes nas rochas dos principais depósitos minerais, principalmente àqueles voltados para exploração de metais base. Essa revisão bibliográfica tem como característica básica caracterizar os principais depósitos minerais relacionados à prospecção mineral de ouro e suas relações com a aeromagnetometria.

#### 3.6.11.1 Terrenos do tipo *greenstone belts*

De acordo com Grant (1984), um grande número de metais preciosos é encontrado em complexos metavulcânicos - metassedimentares antigos conhecido como *Greenstone Belts*. Muitos destes *greenstones* são de idades Arqueanas (4 - 2,7 Ga), embora alguns sejam mais jovens.

*Greenstones* no Escudo Canadense, por exemplo, na Província Superior com idades de 2,3-2,7 Ga, apresentam subprovíncias, como Abitibi, com diferentes tipos de mineralização entre elas ouro, urânio e metais base. As principais características desses depósitos são:

- Vulcanismo cálcio-alcálico extensivo de composição andesítica predominantemente - vulcanismo relacionados a arcos vulcânicos em subducção;
- A presença de fluxos ultramáficos próximos à base da seqüência;
- Membros finais ácidos, piroclásticos que usualmente contém minério;
- Recobrimento por sedimentos químicos ou sedimentos químicos metamorfisados.

Minérios redepositados em veios ou fraturas também estão associados com:

- Falhamentos principais com zonas de cisalhamento e fraturas associadas;
- Zonas de alteração nem sempre associada com falhamentos ou zonas de cisalhamentos;
- Intrusões pós-cinemáticas, que agem como fontes de calor direcionando os fluidos com minério através dos condutos - falhas, fraturas e zonas de cisalhamento.

A distribuição e a quantidade de magnetita, segundo Grant (1984), associadas às características estruturais e estratigráficas em regiões do tipo *greenstone belts*, está ligada a dois fatores:

- Primeiro está relacionado às condições superficiais, muito das quais associadas a depósitos minerais epigenéticos, usualmente caracterizadas por falhamentos, zonas de cisalhamento e alterações hidrotermais (carbonatação ou silicificação, ocasionalmente sericitização). Se as rochas hospedeiras com quimismo favorável permanecem em qualquer lugar na vizinhança, elas serão os principais locais de deposição dos metais, já que os falhamentos e fraturamentos produzem aberturas nas rochas através das quais os fluidos mineralizantes podem passar em volumes suficientemente amplos (uma intrusão próxima que produz energia calorífica para manter a circulação dos fluidos e pode ser um fator considerável). As principais alterações podem indicar uma reação química do fluido mineralizante com a rocha encaixante, mudando o estado de oxidação na direção que favorece a precipitação do minério (Holland, 1972).

Zonas tectônicas com falhamentos principais podem afetar a magnetita por diversas maneiras. Rochas permeáveis fracamente oxidantes ou reduzindo-se por soluções aquosas passando em quantidades suficientes, podem causar alterações químicas ao longo destes caminhos. Águas subterrâneas percolando pelas zonas de cisalhamento ou fraturas, causarão a oxidação da magnetita em hematita, desta forma, baixando a intensidade magnética ao longo da zona de falha (Henkel e Guzman, 1977). Soluções quentes ascendendo através de zonas de fraturas em direção à superfície pode afetar o padrão de magnetita através dos fatores:

- Soluções ricas em CO<sub>2</sub> reduzirão a magnetita em siderita. Alteração carbonática sempre diminui a quantidade de magnetita nas rochas, criando uma zona de baixa intensidade magnética sobre a área afetada;
- Soluções ricas em sílica são geralmente oxidantes. Alteração do tipo silicificação, muitas vezes conduz a baixos magnéticos.

- Segundo, à relação da magnetita e da anomalia magnética com o ambiente deposicional. Dentro da seqüência de terrenos do tipo *greenstone*, a relação espacial entre o sulfeto maciço e o conteúdo de magnetita, pode estar diretamente vinculada a uma camada com bandamento rico em ferro e uma outra camada com bandamento rico em sílica chamado formação ferrífera bandada (BIF). O ferro nestas camadas pode estar na forma de óxido de ferro ou pirita. Em terrenos metamórficos de baixo grau, é geralmente sob a forma de pirita ou

hematita, em terrenos de médio a alto grau é mais comum ser na forma de pirita ou magnetita. Devido a sua pequena espessura, estas camadas podem representar baixos magnéticos.

Portanto, as principais características como guia para exploração aeromagnética em sulfetos maciços ricos em ouro, ou em outros metais base como chumbo e zinco, por exemplo, devem incluir:

- Reconhecimento de zonas orogênicas (*greenstones belts*) em mapas aeromagnéticos regionais;
- O delineamento, quando possível, da estratigrafia vulcanossedimentar dentro dos terrenos *greenstones*, pelo zonamento do acamamento dentro de diferentes níveis capazes de produzir magnetita;
- Identificação de pequenas unidades metassedimentares ricas em ferro dentro de metavulcânicas ácidas ou metassedimentares;
- Sulfetação nas paredes das encaixantes básicas quando cortadas por zonas de cisalhamento onde percolaram soluções sulfetadas com ouro (piritização das magnetitas e precipitação do ouro) resultando em baixos magnéticos.

### **3.6.11.2. A magnetita e o modelo de depósito mineral de ouro associado com vulcânicas**

Grant (1984) salienta a importância da pesquisa aeromagnética em modelos deposicionais de ouro associados a rochas vulcânicas. Porém, por um longo tempo, se acreditou que todos os depósitos de ouro encaixados em vulcânicas/sedimentares fossem epigenéticos, onde *stocks* ácidos estariam intrudidos dentro de vulcânicas máficas passivas, ou ambientes sedimentares ricos em ferro. As intrusões supostamente criavam fraturas e produziam fontes de calor direcionando fluidos emanados de fontes desconhecidas, mas contendo metais liberados de rochas vulcânicas, através dos condutos. Os metais, incluindo ouro, seriam depositados se os fluidos encontrassem um ambiente suficientemente redutor, como aqueles produzidos por carbono e íons ferrosos.

Recentemente, algumas opiniões sobre a gênese dos depósitos de ouro em ambientes vulcanossedimentares foram deslocadas em direção a modelos singenéticos (embora eles possam ser melhor descritos como modelos diagenéticos) no qual o ouro foi originalmente emitido por *vents* submarinos vulcânicos no assoalho oceânico e foi subseqüentemente concentrado dentro de depósitos econômicos por deformação e metamorfismo.

O paradigma encontrado para este tipo de depósito inclui diversas teorias para gênese do minério. Todas contem as seguintes feições:

- Uma associação espacial próxima com fluxos ultramáficos (komatiitos), que formam a base do edifício vulcânico consistindo de komatiitos, toleítos, fluxos calcio-alcálicos, brechas vulcânicas e sedimentos químicos;
- Extensivas alterações a baixas temperaturas nas rochas encaixantes. Os mais comuns são carbonatação, sericitização, cloritização e silicificação. Alteração de carbonatos dentro de regiões próximas do minério procede-se do seguinte modo: as rochas ultramáficas nestas zonas são geralmente reconhecidas como talco-carbonato xistos.
- Proximidade aos falhamentos principais, que abriam fraturas e canais nas rochas encaixantes seguidos de extensiva alteração hidrotermal produzindo caminhos para migração do ouro no seu ambiente deposicional;
- Proximidade com intrusivas ácidas (usualmente porfirítico feldspático) que pode ser também um *vent* fóssil ou uma fonte de calor de remobilização e reconcentração tardia.

Existem vários modelos teóricos para a gênese dos depósitos associados a rochas vulcânicas. Desde fontes de ouro associado a rochas ultramáficas, onde o Au é liberado durante a carbonatação e redepositado em veios, até modelos exalativos, associados a *vents* submarinos e dispersos em sedimentos químicos em torno deste *vent*, e posteriormente podem ser redepositados em rochas ultramáficas como um resultado de deformação e metamorfismo.

O que todos esses modelos tem em comum, no entanto, é o seguinte:

- Eles requerem extensiva alteração carbonática das rochas encaixantes;
- Requerem proximidades com os principais sistemas de falhas para preparar o terreno para redeposição do ouro;
- Requerem edifício vulcânico que contém uma alta proporção de rochas máficas e ultramáficas e
- Sedimentos químicos (vulcanogênicos) são desejáveis.

Guias para exploração aeromagnética para identificar minério de ouro associado a rochas vulcânicas incluirão todos ou alguns desses passos:

- Em escala regional, a identificação dos terrenos do tipo *greenstone belt*, e o delineamento de fases vulcânicas máficas, ácidas e sedimentares dentro do cinturão;

- Identificação das principais zonas de falhas;
- Reconhecimento de áreas alteradas, especialmente zonas potenciais de alteração carbonática;
- Identificação de rochas ultramáficas serpentinizadas e/ou formações ferríferas dentro ou próximas das alterações;
- Identificação de pequenos *stocks* pórfiros ácidos, que às vezes apresentam halos de magnetita ou podem conter pequenas quantidades de magnetita e
- Delineamento de camadas máficas/ultramáficas altamente alteradas dentro de zonas vulcânicas.

Dessa maneira, portanto, é difícil e complexa a aplicação desse método nesse tipo de ambiente deposicional para ouro, já que as rochas máficas e ultramáficas sofrem além dos processos de alteração (carbonatação) que destroem a magnetita, múltiplos processos de deformação e metamorfismo ao longo dos períodos geológicos. A esperança, segundo Grant (1984), é que sobreviva magnetita suficiente para ser detectada por alta resolução, alta sensibilidade na pesquisa aeromagnética. Se isto for possível, a pesquisa pode produzir ótimas definições para este tipo de modelo deposicional para ouro.

Hoover *et al.* (1992) compilaram uma série de referências bibliográficas e elaboraram modelos geofísicos para pesquisa mineral de metais base. Dentre os principais modelos geofísicos para depósitos de ouro, dois podem se enquadrar na área de pesquisa deste trabalho, utilizando métodos de pesquisa aeromagnética como referência, o modelo geofísico em veios de Au-quartzo com baixos teores de sulfeto e modelo geofísico para Au do tipo *Homestake*.

### **3.6.11.3. Modelo geofísico em veios de Au-quartzo com baixos teores de sulfeto**

*Greenstone belts*, metassedimentos oceânicos, rochas vulcânicas regionalmente metamorfisadas, serpentinitos e gabros alpinos, grauvaca, chert, folhelhos e quartzitos, compõem as principais litologias deste modelo de depósito mineral, assim como batólitos graníticos tardios associados à falhas e sistemas de juntas produzidas por compressão regional.



Ouro em veios de quartzo maciço associado geralmente ao metamorfismo regional são persistentes ao longo de falhamentos de alto ângulo regional. O ambiente geológico pode ser definido por estudos com sensores remotos para mapeamentos regionais de lineamentos, falhas, sistema de juntas e limites litológicos (Longman, 1984; Clark *et al.* 1990; Crosta and Moore, 1989).

Pesquisas aeromagnéticas também podem definir falhas regionais e zonas de cisalhamento e mapear a distribuição de rochas máficas, ultramáficas e sedimentos dentro de terrenos do tipo *greenstone* (Lindeman, 1984; Boyd, 1984; Isles *et al.*, 1989). Dados aeromagnéticos podem ser úteis em escala de depósito identificando ultramáficas alteradas, mostradas como áreas planas ou baixos magnéticos rasos, e delineando estruturas locais, assim como sua estratigrafia e intrusivas associadas, definindo melhor os depósitos minerais (Pichette, 1982).

#### **3.6.11.4. Modelo geofísico para Au do tipo *Homestake***

Similar geofisicamente ao modelo anterior, o ambiente geológico é principalmente de idade Arqueana, regionalmente metamorfisada na fácies xisto verde, com litologias do tipo rochas metavulcânicas ácidas e básicas, komatiitos e sedimentos vulcanoclásticos intercamadados com formações ferríferas bandadas. Unidades *greenstone* tipicamente intrudidas por plútons ácidos e localmente por quartzo e/ou sienito pórfiro. Os depósitos são comuns próximos à divisões regionais entre rochas metavulcânicas e metassedimentares em cinturões do tipo *greenstone*. Depósitos do tipo *stratabound* e estratiforme consistindo de minérios bandados de ouro nativo com vários sulfetos em silicatos ricos em Fe ou sedimentos químicos ricos em carbonato recobrando veios e zonas alimentadoras (*feeder*) em *stockworks*, muitas vezes intercamadados com fluxos de rochas. Camadas podem ser cortadas por veios de quartzo-carbonato contendo ouro, estruturalmente controlados.

O ambiente geológico pode ser mais bem definido com auxílio de sensores remotos que podem delinear lineamentos regionais, estruturas principais, limites litológicos e áreas de alteração hidrotermal (Honey ; Daniels, 1985; Crosta ; Moore, 1989; Yatabe *et al.*, 1984; Longman, 1984). *Greenstone Belts* podem ser contornados por pesquisa aeromagnética, que podem refletir um baixo magnético regional se as rochas são pobres em magnetita, em outros casos um alto magnético se possuem rochas ricas em magnetita (Grant, 1984). Pesquisa aeromagnética é usada para definir estruturas regionais e localizar metassedimentos ricos em

ferro e rochas vulcânicas máficas e ultramáficas dentro de cinturões do tipo *greenstone* (Lindeman, 1984; Boyd, 1984).

O depósito pode ser definido com pesquisa magnética em detalhe, utilizadas para mapear formações ferríferas bandadas, bem como prever extensões direcionais, espessura do acamamento e mergulho das zonas magnéticas dentro de seqüências estratigráficas (Lindeman, 1984) e auxiliar no desmembramento das estruturas que controlam a mineralização. Dados magnéticos detalhados são empregados para mapear intrusivas e diques associados com a zona de mineralização e identificar alterações que envolvem a destruição e a formação de minerais magnéticos.

# Capítulo 4

## Processamento de dados aerogeofísicos gamaespectrométricos e magnéticos da região do Complexo Bossoroca

### 4.1 Introdução

Nesse capítulo serão discutidos os principais procedimentos na geração e no realce dos mapas magnetométricos e aerogamaespectrométricos em malhas regulares e os principais métodos de pré-processamento e processamento dos dados visando suas interpretações.

### 4.2 Critérios para o processamento

O processamento utiliza o programa MAGMAP, disponível no Geosoft 4.3 (1999), que compreende, segundo Vasconcellos *et al.* (1994), uma série de algoritmos que efetuam a aplicação de filtros específicos em dados sob a forma de malha regular, com propósito de realçar, atenuar, eliminar ou transformar determinadas feições lineares e/ou planares, em

função dos dados e dos objetivos de integração com a geologia. A saída ao programa consiste em outra malha regular, contendo as mesmas dimensões da malha regular de entrada.

As operações básicas devem seguir os seguintes critérios:

- Pré-processamento dos dados aerogamaespectrométricos
  1. Correção do efeito *Compton* (espalhamento);
  2. Correção altimétrica;
  3. Nivelamento
- Pré-processamento dos dados aeromagnetométricos
  1. Remoção da variação magnética diurna;
  2. Nivelamento das linhas de vôo e de controle;
  3. Remoção do *background* atmosférico.
- Processamento

#### FASE I

1. Geração de malhas regulares;
2. Remoção do campo magnético regional da Terra (com base no modelo do IGRF);
3. Convergência dos dados aerogamaespectrométricos
4. Micronivelamento
  - a) Transformação Fourier dos dados do domínio do espaço para o domínio da frequência;
  - b) Determinação dos espectros de potência;
  - c) Antitransformação Fourier dos dados filtrados de volta para o domínio do espaço;

#### FASE II

5. Cálculo do espectro de potência para determinação das frequências de corte;
6. Filtragens.

Nesse trabalho será focalizada a parte do processamento nas suas fases I e II. A seguir, serão discutidas algumas características inerentes ao processamento dos dados aerogeofísicos.

### 4.3 Geração de Malhas Regulares

Os produtos utilizados para a interpretação são mapas aeromagnetométricos e aeroaerogamaespectrométricos obtidos a partir de malhas regulares. Além das frequências de

interesse geológico estarem representadas nessas imagens, ruídos e falsas anomalias também estão contidos através das linhas de vôo. Algumas dessas feições podem ser devidas a baixa qualidade dos dados, escolha indevida de parâmetros de pesquisa, algoritmos das malhas regulares inadequados ou escolha inapropriada dos parâmetros utilizados nesses algoritmos.

O objetivo inicial desse capítulo é estabelecer parâmetros para auxiliar no melhor entendimento possível da qualidade dos dados aerogeofísicos magnetométricos e radiométricos, e investigar o possível uso do FFT 2D (Fast Fourier Transform - transformada rápida Fourier em duas dimensões) como uma ferramenta para diminuir os problemas causados por esses ruídos e falsas anomalias em malhas regularmente espaçadas.

#### 4.4 Transformada Fourier em Dados Regularmente Espaçados

De acordo com Billings ; Richards (2000), a transformada Fourier,  $F(u, v)$ , de uma função contínua,  $f(x, y)$ , definido sobre o espaço 2D é dado por:

$$\bullet \int_{-\infty}^{\infty} du \int_{-\infty}^{\infty} dv f(x, y) \exp[2\pi.i(ux + vy)]$$

Se  $(x, y)$  são coordenadas espaciais em metros, então  $(u, v)$  são coordenadas de frequência em ciclos por metro. A transformada rápida de Fourier (FFT) é um método que decompõe a imagem dentro de uma série de funções senos e cossenos de diferentes frequências (ou comprimento de onda). A frequência mais alta é determinada pelo tamanho de célula da imagem via relação de Nyquist. A frequência de corte Nyquist é a máxima frequência que pode ser analisada com dados amostrados regularmente. Com a amostragem espacial com incremento  $\Delta x$  a frequência de Nyquist é:

$$\bullet u_{m\acute{a}x} = 1/2\Delta x.$$

Com os dados aeromagnéticos espaçados há diferentes frequências de corte a serem consideradas. O espaçamento das linhas de vôo e o espaçamento entre as amostras correspondem a dois diferentes cortes nas direções entre pontos e ao longo das linhas de vôo, como mostrado na Figura 4.1. Os dados são usualmente interpolados numa malha regular com *pixels* quadrados, que então impõe um corte relacionado ao tamanho da célula da malha regular (Figura 4.1).

Essa alta frequência oscila através de um ciclo cheio  $N$  vezes ao longo do eixo horizontal e  $M$  vezes ao longo do eixo vertical da imagem. Há então uma frequência adicional  $N/2-1$  ao longo do eixo horizontal e uma frequência adicional  $M/2-1$  ao longo do eixo vertical.

Cada uma destas frequências intermediárias passa por um número exato de oscilações entre os limites da imagem.

Se o conjunto das imagens for composto por uma simples onda senoidal de uma frequência particular, então a FFT da imagem seria zero em qualquer lugar exceto na frequência correspondente. Imagens reais são mais complicadas do que esta e a FFT teria componente não zero em toda frequência espacial. A baixa frequência (longo comprimento de onda) oscila poucas vezes sobre a extensão da imagem no qual refletirá no campo magnético total. Por outro lado, alta frequência (baixo comprimento de onda) oscilará mais vezes através da imagem que reflete nas variações do campo magnético de origem rasa (próximo à superfície).

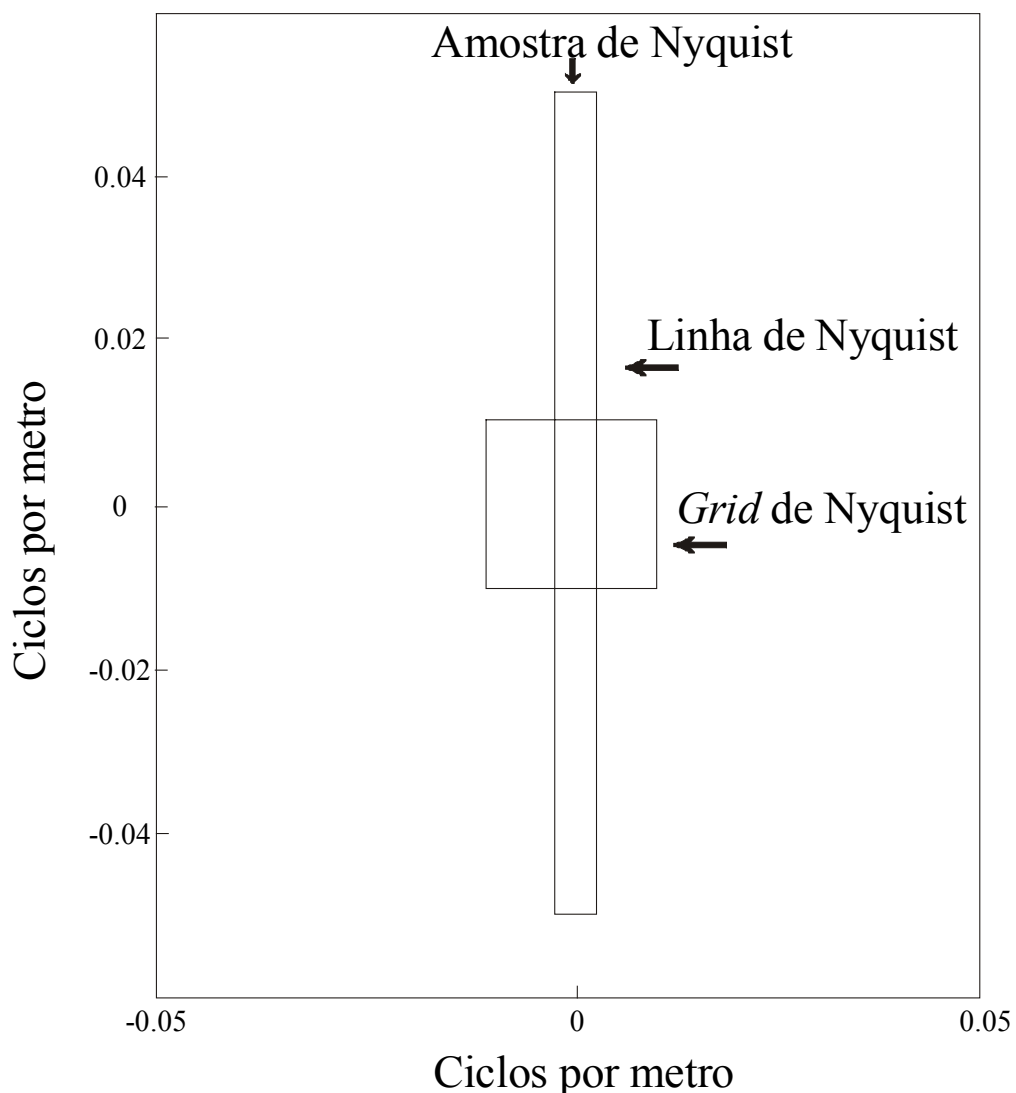


Figura 4.1. Ao longo das linhas das amostras, através das linhas de vôo e o *malha regular* de corte na frequência de Nyquist assumindo uma pesquisa com 200 metros de espaçamento de linhas de vôo. Dez metros entre as amostras e 50 metros o tamanho do *malha regular*. Alta amostragem ao longo das linhas entre amostras e baixa amostragem entre as linhas de vôo (Linha de Nyquist), modificado de Billings ; Richards (2000).

Blum (1999) demonstra que quando os movimentos não são periódicos a soma da série Fourier é substituída por uma integral Fourier, no qual decorre que:

- $$F(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-iku} du$$

então,

- $$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(u)e^{-ikx} dx .$$

A função  $F(u)$  é a transformada Fourier de  $f(x)$  e pode ser escrita  $F(u)=F\{f(x)\}$ . A função  $f(x)$  é a transformada inversa de Fourier de  $F(u)$  e pode ser escrita  $f(x)=F^{-1}\{F(u)\}$ . A transformada rápida de Fourier (FFT) é usada para converter dados no domínio do espaço para o domínio da frequência, onde qualquer convolução pode ser feita pela multiplicação de funções apropriadas.

#### 4.5 Interpolação

O algoritmo de interpolação terá uma substancial influência na transformada de Fourier calculada, particularmente nas direções das linhas transversais de vôo. Para o trabalho, foi utilizado o algoritmo implementado pela Geosoft<sup>®</sup> (1999), semelhante ao utilizado por Briggs (1974) e Swain (1976) e segue um parâmetro de tensão variável para superar problemas em que a função assume diversos valores (Smith ; Wessel, 1990).

O algoritmo estima valores para malha nos nós de uma grade comum. Isto é baseado na média do inverso da distância dos dados atuais dentro de um raio de busca específico. Se não há dados dentro do raio, a média de todos os pontos é usada. Um método iterativo com algoritmo de mínima curvatura é empregado para ajustar a malha para preparar os pontos dos dados atuais próximos aos nós da malha. Depois que um ajuste aceitável é realizado, o tamanho de célula é dividido. O mesmo processo é então repetido usando a malha original como superfície inicial. Este procedimento é repetido até que a superfície de mínima curvatura é ajustada ao tamanho de célula final.

Um importante parâmetro no processo é o número de interações usadas para ajustar a superfície em cada passo. Os grandes números das interações, os mais próximos da superfície finais serão a superfície de curvatura mínima verdadeira. No entanto, o tempo de processamento é proporcional ao número de interações. O processo para quando:

- Ele alcança um número máximo especificado de interações, ou

- Uma certa porcentagem dos pontos de dados atual está dentro de um limite de tolerância da superfície de curvatura mínima.

## 4.6 Mapas de Contorno

Hood *et al.* (1979) definem mapas de contorno como sendo meramente um meio de representar em duas dimensões, uma superfície que estaria em três dimensões. Os dados aeromagnéticos compilados podem ser considerados como contínuos em apenas uma direção – ao longo das linhas de vôo. É necessário gerar, portanto, uma superfície destes dados antes do contorno ser traçado. A superfície pode ser representada por uma expressão algébrica e desta forma, os contornos podem ser definidos também por uma expressão algébrica pela substituição de um valor constante da variável vertical ( $Z$ ).

A partir da análise do banco de dados do projeto e levando em consideração a escala do mapa a ser gerado, definiu-se a dimensão da célula das malhas regulares. À exceção dos casos específicos, normalmente define-se o tamanho de célula com o lado equivalente a um valor entre 1/4 do espaçamento médio entre linhas de vôo. Considerando um projeto com espaçamento entre linhas de vôo de 1 Km, a dimensão da célula da malha regular foi de 250 metros, utilizando o algoritmo de mínima curvatura para sua interpolação.

Nesse trabalho, além dos mapas de contorno, foram utilizados mapas pseudocoloridos e tons de cinza como meios de representações das imagens em duas dimensões. Como padrão, todas as imagens foram reduzidas em 75% do seu tamanho original.

## 4.7 Freqüência Máxima

A freqüência máxima representada no domínio de onda é determinada pelo tamanho da célula da malha regular pela relação de Nyquist:

- $u_{máx} = 1/2\Delta x$  e
- $u_{máx} = 1/2\Delta y$ .

Qualquer freqüência maior do que estes parâmetros serão *aliased* (falseados) de volta dentro de partes menores do espectro. A freqüência máxima atual resolvida para os dados é determinada pela taxa de amostragem ao longo das linhas de vôo e linhas transversais da pesquisa. Quando os dados são colocados em malha regular, ao longo e transversalmente são



usualmente escolhidos 1/4 ou 1/8 do espaçamento da linha de vôo. Este resulta num aumento dos pontos dos dados nas linhas transversais e diminui ao longo das linhas. Ao longo das linhas a questão central é se o tamanho da célula escolhida é suficiente para prevenir o falseamento (*aliasing*) do sinal na imagem interpolada. A seleção do tamanho da célula é fundamental e envolve um compromisso delicado entre o sinal representado fielmente ao longo das linhas, prevenindo os mapas de artefatos nas linhas transversais.

#### **4.8 Remoção do campo magnético regional da Terra**

O processamento de dados aeromagnéticos é um passo importante para obtenção dos mapas aerogeofísicos, pois assegura a remoção dos artefatos (ruídos) provenientes do aerolevanteamento. Foram efetuadas correções do IGRF, das variações direcionais entre linhas de vôo através do método de micronivelamento (decorrução) e da separação das fontes magnéticas com diferentes comprimentos de onda.

Dobrin (1988) comenta que, na necessidade da junção de diferentes pesquisas observadas em diferentes tempos, sempre comparando respostas magnéticas individuais em diferentes áreas, é necessário desenvolver modelos que estimam valores e mudanças anuais no principal campo magnético da terra e um destes modelos é o IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*). O IGRF é um modelo matemático do campo principal da terra e suas variações temporais que consiste de harmônicos esféricos baseados em dados magnéticos observados no mundo inteiro, que correspondem a comprimentos de onda de baixa frequência provenientes a partir do núcleo terrestre.

Apesar de poucas dimensões (25x25 km), foram escolhidos seis pontos na área de pesquisa (Tabela 4.1), para se obter valores de  $F$ ,  $I$  e  $D$ , na época em que foi feito o aerolevanteamento (01/06/1973), com o objetivo de subtrair dos dados originais. A elevação média usada foi de 300 metros. Como a área representa pouca variação em nanoteslas, foi estabelecida a utilização de valores médios desses pontos, para a remoção do IGRF e para obtenção dos valores utilizados nesse trabalho. Os dados foram obtidos, via internet, no *site* da NOAA National Data Center.

A média aritmética para  $F$  foi de 23891 nT, utilizado para remoção do IGRF dos dados originais. Foram feitas médias aritméticas para inclinação e declinação geomagnética a fim de se obter valores para filtragem de redução ao pólo dos dados aeromagnéticos.

Tabela 4.1. Pontos referentes à área de pesquisa para a correção do IGRF.

Ponto 1	Latitude	D	I	H	X	Y	Z	F
	Longitude	(graus)	(graus)	(nT)	(nT)	(nT)	(nT)	(nT)
	-30°17'46"	-8°18.5'	-29°19.6'	20827	20609	-3010	-11700	23889
	-53°48'26"							
Ponto 2	Latitude	D	I	H	X	Y	Z	F
	Longitude	(graus)	(graus)	(nT)	(nT)	(nT)	(nT)	(nT)
	30°17'58"	-8°26.7	29°23.8	20809	20583	3056	11724	23884
	53°39'5"							
Ponto 3	Latitude	D	I	H	X	Y	Z	F
	Longitude	(graus)	(graus)	(nT)	(nT)	(nT)	(nT)	(nT)
	-30°25'53"	-8°15.3'	-29°29.0'	20805	20589	-2987	-11763	23900
	-53°48'40"							
Ponto 4	Latitude	D	I	H	X	Y	Z	F
	Longitude	(graus)	(graus)	(nT)	(nT)	(nT)	(nT)	(nT)
	-30°26'5"	-8°23.5'	-29°33.2'	20563	20786	-3034	-11786	23895
	-53°39'18"							
Ponto 5	Latitude	D	I	H	X	Y	Z	F
	Longitude	(graus)	(graus)	(nT)	(nT)	(nT)	(nT)	(nT)
	-30°20'33"	-8°20.2'	-29°24.1'	20594	20813	-3018	-11729	23891
	-53°45'23"							
Ponto 6	Latitude	D	I	H	X	Y	Z	F
	Longitude	(graus)	(graus)	(nT)	(nT)	(nT)	(nT)	(nT)
	-30° 20'40"	-8°25.6'	-29°27.0'	20801	20576	-3049	-11744	23888
	-53°39'9"							

Legenda:

D = declinação magnética

I = inclinação magnética

F = vetor do campo magnético medido

Modelo: DGRF – 1970

H = componente horizontal

X = componente oeste

Elevação: 0.30 km

Y = componente leste

Z = componente vertical

Data de interesse: 06/01/1973

## 4.9 Espectro de potência

Vasconcellos *et al.* (1994) ressaltam que o programa MAGMAP permite a geração de espectro de potência em uma dimensão (média radial da malha regular) e em duas dimensões. O filtro em uma dimensão analisa o comportamento das frequências no malha regular que pode definir frequências de corte para determinados filtros. O espectro de potência em duas dimensões é uma forma de representação de anomalias magnéticas no domínio da frequência. A interpretação dos espectros de potência é baseada em um modelo de prismas verticais, de extensão infinita em profundidade constante.

O espectro de potência dos dados do campo magnético total pode ser usado para estimar aproximadamente a profundidade média das rochas magnéticas em subsuperfície (Spector, 1967; Spector ; Grant, 1970; Battacharya, 1966). Essas profundidades são estabelecidas pela inclinação do espectro de potência na parte final mais baixa do comprimento de onda total. O método é baseado na suposição de que o efeito magnético da superfície de embasamento pode ser simulado por uma distribuição não correlacionada de blocos de profundidades, comprimento, espessura e magnetização variada. Numa plotagem logarítmica, se um grupo de blocos tem uma profundidade similar, eles cairão dentro de uma inclinação constante. Desta maneira, se há um grupo de blocos com grupos individuais com uma ampla diferença na profundidade, como vulcânicas rasas sobre um embasamento profundo, a plotagem será separada em partes com diferentes inclinações e a magnitude da inclinação é a medida da profundidade. O método tem sua aplicação principal para avaliação geral da área, dando uma separação relativa e a forma parcial das anomalias magnéticas com diversas zonas com suas profundidades reconhecidas. Esse método não se aplica ao reconhecimento de profundidades individuais, porém, tem um objetivo de confirmar a profundidade geral de uma superfície anômala.

Um aspecto negativo do espectro de potência a ser ressaltado é de que janelas finitas possuem, na grande maioria das vezes, anomalias truncadas, ou seja, quanto menor a janela amostrada, maior a restrição do uso.

A representação da potência dos sucessivos harmônicos é feita pelos espectros de potência. As frequências de Nyquist, valores acima do dobro da distância entre os pontos de amostragens originais, incorporam altas frequências aos dados, sendo desprezados na análise de Fourier (Carvalho, 1999).

Antes de aplicar o filtro desejado no domínio da frequência, deve-se tomar algumas providências: (a) remover uma superfície de tendência, geralmente de primeira ordem;

expandir a malha em pelo menos 10% do seu tamanho; (b) à parte expandida deve ser preenchida com valores periódicos extrapolados da malha original (para evitar o efeito de borda); e (c) verificar a forma do espectro gerado para determinar quaaais filtros serão utilizados (Blum, 1999).

A Figura 4.2 corresponde ao espectro de potência radial médio para as rochas da região do Complexo Bossoroca e a profundidade média estimada das rochas magnéticas subsuperficiais. Fontes intracrustais alcançam profundidades médias próximas a 1,5 km, enquanto que fontes superficiais alcançam profundidades em torno de 825 metros.

A função do espectro de potência radial médio  $[f(x)]$ ,  $|F(k)|^2$  é expressa pela equação:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |F(k)|^2 dk ,$$

onde  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  é o número de onda e  $\lambda$  é o comprimento de onda (Hsu 1984; Blakely

1996, *apud* Blum (1999)).

O espectro de energia radial médio corresponde à média da energia nas diversas direções, possivelmente causadas por fontes de natureza diferentes, para um mesmo número de onda. A expressão utilizada no programa Geosoft® (1999), relacionando a profundidade e espectro de energia é:

- $h = \frac{-s}{4\pi}$ ,

onde  $h$  é a profundidade estimada da fonte e  $s$  é a declividade do logaritmo do espectro de energia.

As quebras na declividade da função espectral permitem a separação do topo das fontes causadoras de anomalias de acordo com sua profundidade, dividindo-se em componentes de fontes profundas, rasas e aquelas devidas aos ruídos. A determinação da profundidade e da frequência permite que sejam utilizados filtros de frequência como, por exemplo, passa-baixa, passa-alta, passa-banda, cosseno direcional e *butterworth*, separando as fontes e representando-as individualmente.

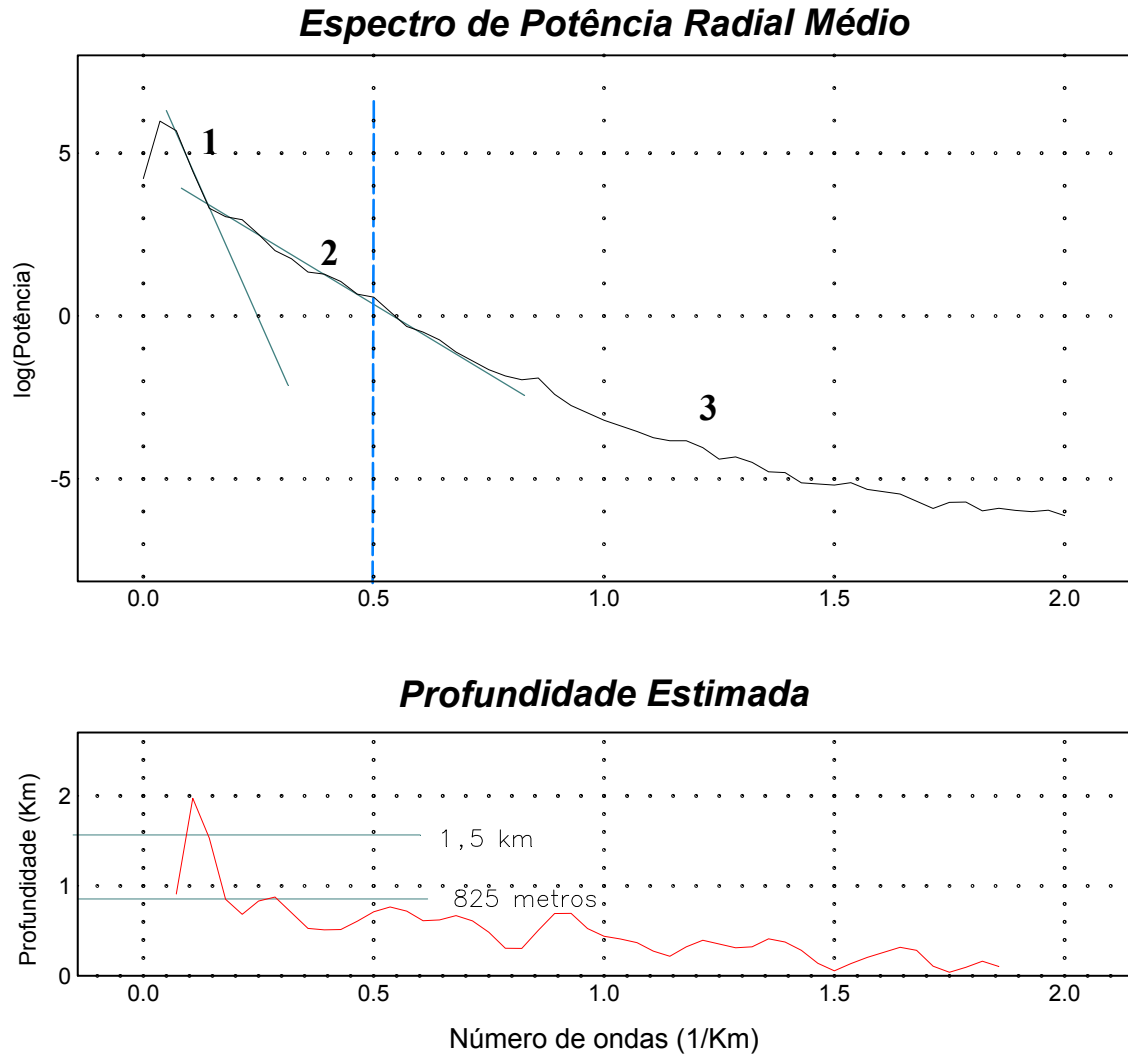


Figura 4.2. Espectro de potência radial médio do campo anômalo para a região do Complexo Bossoroca e sua profundidade estimada, onde (1) são fontes profundas ou intracrustais com 1,5 km de profundidade, (2) fontes intermediárias ou superficiais com 825 metros de profundidade e (3) Frequência de Nyquist.

#### 4.10 Micronivelamento

Blum (1999) salienta que o método consiste em eliminar da malha tendências em determinada direção (direção da linha de vôo), usando um filtro direcional (cosseno direcional). Testes realizados mostraram que esse filtro, aplicado no domínio de Fourier, pode eliminar mais do que se supõem ou introduzir ruído (fenômeno de Gibbs).

Na análise do espectro de potência, pode-se verificar que a frequência de Nyquist situa-se entre 1.14 a 2.0 rad/km para fontes superficiais, as frequências intermediárias entre

0.1 a 1,14 rad/km indicando fontes com topo em torno de 825m e fontes infracrustais com frequências entre 0 e 0.1 rad/km com fontes magnéticas de profundidades em torno de 1,5 km.

Os passos aplicados para o método de decorrugação foram aqueles mostrados pelas notas técnicas do programa Geosoft (1999). O procedimento consta dos seguintes passos:

- Seleção de dois filtros para o micronivelamento. Foram escolhidos o filtro *Butterworth* e Cosseno Direcional;
- Especificação dos parâmetros para os dois filtros, nos quais constam:
  1. **Butterworth**: 0,001 ciclos/metro como limite de corte para o comprimento de onda; ordem de filtro (8); Passa-alta;
  2. Cosseno Direcional: direção perpendicular às linhas de vôo (45°); grau da função cosseno de 0.5; rejeitando as linhas de vôo;
- Esses parâmetros serão salvos num arquivo específico para que se possa aplica-lo na malha regular contendo o campo magnético total (com os parâmetros do IGRF removidos)
- Após essa aplicação, será gerando a malha regular contendo os problemas de nivelamento, onde esse arquivo contendo os erros será subtraído da malha regular do campo magnético total para obtermos a malha regular corrigida.

Os algoritmos do filtro *Butterworth* e cosseno direcional são os seguintes:

- $$L(k) = \frac{1}{1 + \left[ \left( \frac{K}{K_c} \right)^n \right]}$$

para filtro *Butterworth*, com  $K_c$  sendo o número de onda central, para valores de número de onda  $K$  entre  $K_0 \leq K < K_1$ , ( $K_0$  o menor número de onda para corte e  $K_1$  o maior número de onda para corte) e  $n$  o grau da função do filtro;

- $$L(u, v) = \left| \cos^n \left( \alpha - \theta + \frac{\pi}{2} \right) \right|,$$

para filtro do tipo cosseno direcional, rejeitando a direção  $\alpha$  em graus (0-360 em relação ao norte),  $n$  é o grau da função cosseno e  $\theta$  é a direção do número de onda, de acordo com Blum (1999).

As Figuras 4.3 e 4.4 representam o campo magnético total com os dados originais e o campo magnético total anômalo (ou residual) micronivelado, da região do Complexo Bossoroca, respectivamente.

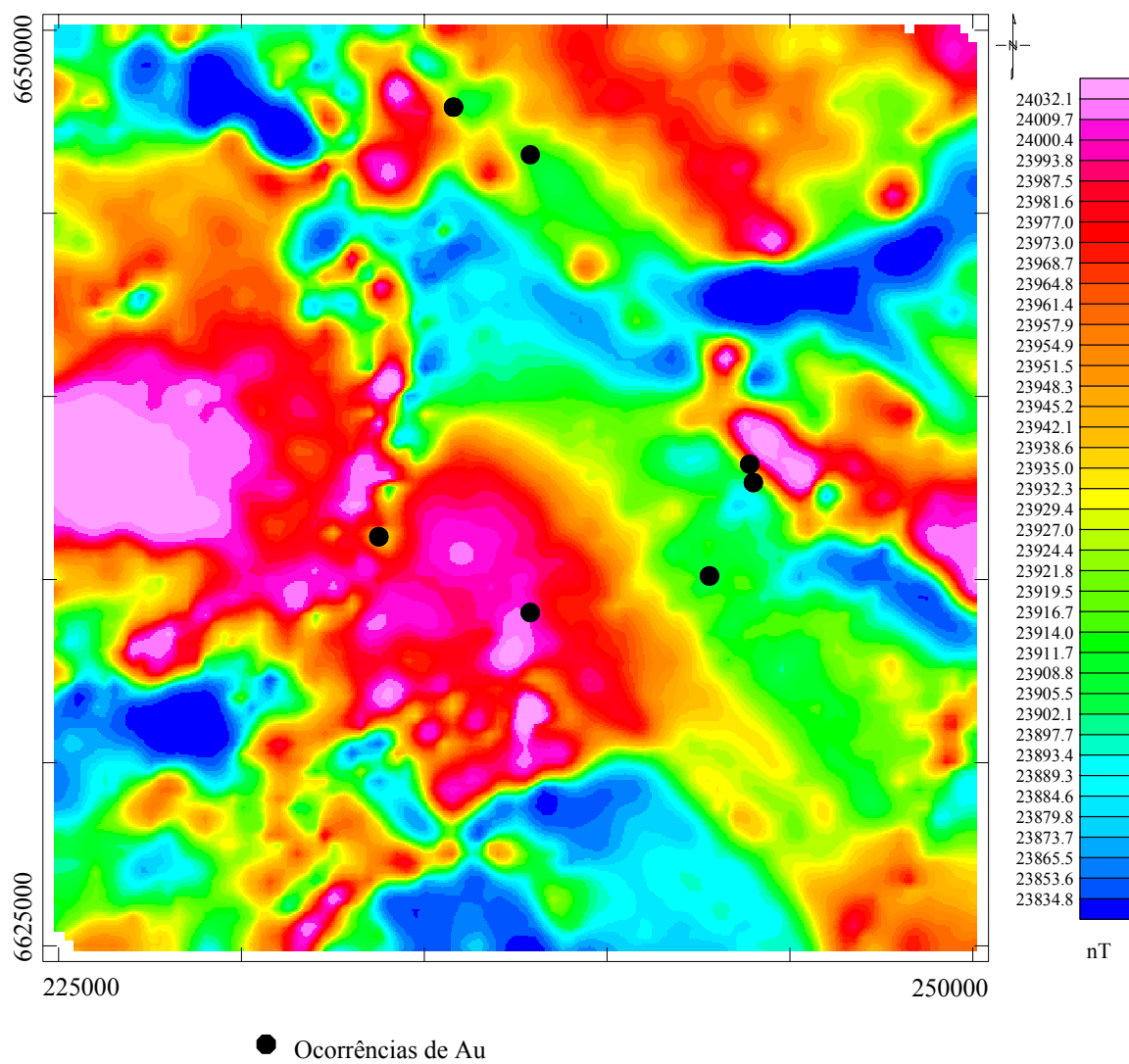
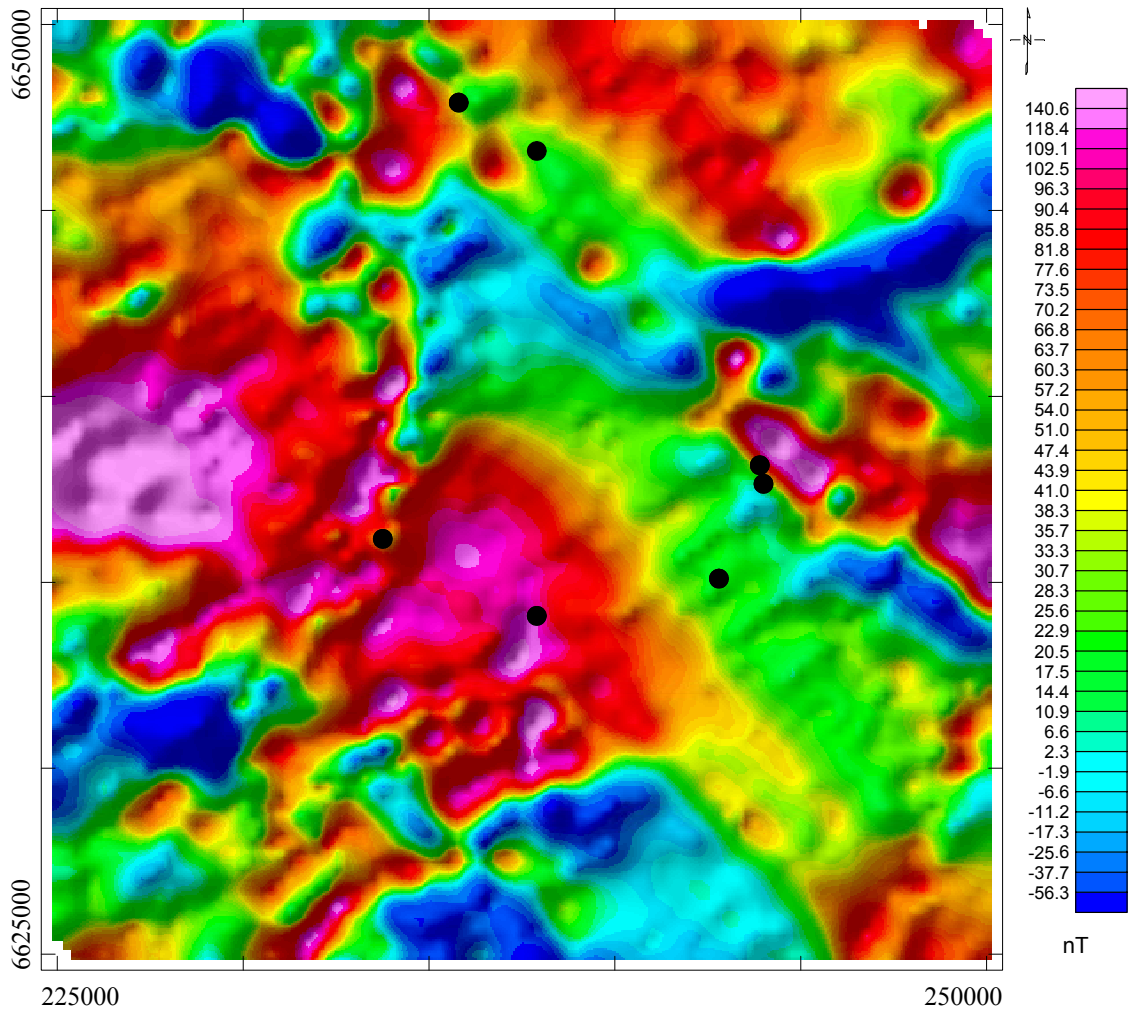


Figura 4.3. Mapa do Campo magnético total da região do Complexo Bossoroca.



● Ocorrências de Au

Cor	Pseudocoloração
Método de Coloração	Padrão
Inclinação	45°
Declinação	135°
Fator de Escala Vertical	100

Figura 4.4. Imagem do campo magnético anômalo e suas principais características de realce.



#### **4.10.1 Aplicação dos Filtros nos Mapas Aeromagnéticos**

De acordo com Dobrin (1988) existem várias técnicas de filtragem que podem ser aplicadas tanto no domínio do espaço quanto no domínio da frequência, sendo que esta é muitas vezes mais eficiente e instrutiva.

As principais transformações nos dados magnéticos são realizadas por operações de filtragem que visam separar os sinais de diferentes formas e profundidades. O método matemático da convolução é a operação fundamental na filtragem. Consiste em uma média móvel ponderada, cujos pesos são representados pelos coeficientes dos filtros, e pode ser desenvolvida para mais de uma dimensão. O resultado da convolução contém apenas frequências presentes no filtro e no sinal (Luiz e Silva, 1995 *apud* Parro 1998).

Para as frequências determinadas no pré-processamento, e posteriormente analisadas, ficou determinado à aplicação dos seguintes filtros no domínio da frequência: continuação para cima (1000 metros), primeira e segunda derivada vertical, derivada horizontal, redução ao pólo, sinal analítico, integração vertical.

#### **4.10.2 Continuação para cima (*Upward Continuation*)**

Henderson ; Zeitz (1949) foram dos primeiros geofísicos a aplicarem o método de continuação para cima, integrando mapas aeromagnéticos de intensidade total na cidade de Elk, Oklahoma, Estados Unidos. É considerado um filtro de limpeza por não produzir efeito de borda e é utilizado para remover ou minimizar os efeitos de fontes rasas e ruídos (Geosoft 1999). Corresponde a uma suavização e sua interpretação magnética é utilizada para comparar medidas feitas em diferentes altitudes (Parro 1998). As Figuras 4.5 e 4.6 representam as imagens da continuação para cima do campo magnético anômalo (1000 metros e 3000 metros, respectivamente) da região do Complexo Bossoroca.

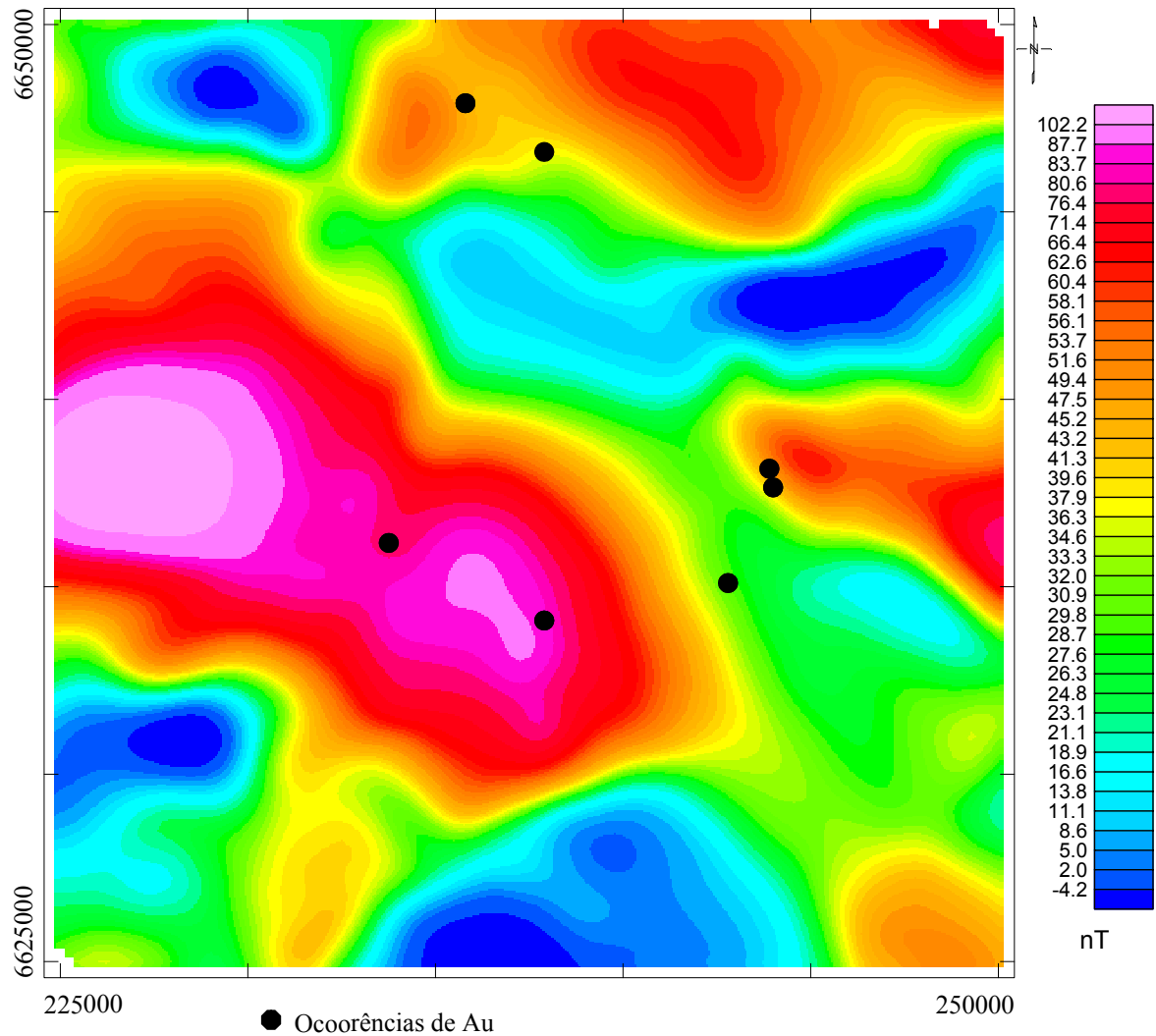


Figura 4.5. Imagem da continuação para cima (1000 metros) do campo magnético anômalo.

### 4.10.3 Primeira e Segunda Derivada Vertical

Carvalho (1999) afirma que as derivadas verticais do campo magnético anômalo correspondem à medida da variação do campo magnético ao longo do eixo Z. Matematicamente, a transformada de Fourier da derivada vertical de ordem  $n$  do campo magnético anômalo, no domínio da frequência, pode ser computada multiplicando-se o espectro de amplitude do campo magnético ( $\mathfrak{F}[\phi]$ ) por um fator  $k$  que representa as frequências espaciais nas direções x e y.

O algoritmo matemático para derivada vertical é:

$$1. \quad \mathfrak{F}\left[\frac{\partial^n \phi}{\partial z^n}\right] = |k|^n \times \mathfrak{F}[\phi]$$

onde  $\mathfrak{F}$  é a transformada de Fourier:

$$2. \quad |k| = (u^2 + v^2)^{1/2}$$

$\phi$  é o campo magnético anômalo,  $n$  é a ordem de derivação  $u$  e  $v$  as frequências espaciais associadas às amplitudes do campo magnético nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente.

A aplicação do filtro de primeira derivada vertical é apropriada para realçar os componentes de fontes mais rasas, eliminando as feições de componentes de fontes intermediárias. A aplicação do filtro de segunda derivada realça mais ainda os componentes de fontes mais rasas, atenuando ou eliminando os outros componentes, Vasconcellos *et al* (1994).

De acordo com Church ; Pettipas (1990) a segunda derivada está relacionada à taxa de curvatura do campo magnético e é particularmente útil para localizar e delinear anomalias magnéticas. Os contornos da segunda derivada vertical podem coincidir com feições importantes como limites de corpos litológicos, falhas e zonas mineralizadas. Vasconcellos *et al* (1994), salientam que os mapas de segunda derivada em conjunto com o filtro de redução ao pólo são excelentes ferramentas para correlação com a geologia, considerando que as feições geofísicas superficiais são realçadas e geralmente têm correlação com a geologia de superfície. As Figuras 4.7 e 4.8 representam os mapas de primeira e segunda derivadas do campo magnético anômalo da região do Complexo Bossoroca. Mapas de contorno com valor zero (como mostrado na Figura 4.10) delimitam, teoricamente, as fontes causadoras das anomalias.

#### 4.10.4 Redução ao pólo

Dobrin (1988) salienta que a forma da anomalia magnética não apenas depende do formato e da susceptibilidade do corpo, mas também da direção de magnetização e da direção do campo regional. A redução ao pólo transforma uma anomalia que seria observada se a magnetização e o campo regional fossem verticais (como se a anomalia fosse medida no pólo norte magnético). A redução ao pólo é um caminho para remover assimetrias causadas por magnetizações não verticais ao campo regional e produz um meio mais simples de interpretação. Em particular, as anomalias estarão mais centradas sobre os respectivos corpos causadores da anomalia, um posicionamento que facilita a comparação com outras técnicas

geofísicas, como mapas gravimétricos e sísmicos, por exemplo. Vasconcellos *et al.* (1994), afirma que é necessário o auxílio de um filtro cosseno direcional, já que comumente aparecem na *malha regular* alinhamentos segundo a direção do meridiano magnético (declinação). A expressão matemática, derivada da fórmula de Grant ; Dodds (1972), do filtro redução ao pólo é:

$$\bullet \quad L(\theta) = \frac{1}{[\text{sen}(I') + i \cos(I) \cos(D - \theta)]^2}$$

onde:

$\theta$  é a direção do comprimento de onda,  $I$  é a inclinação magnética,  $D$  é a declinação magnética e  $I'$  é a direção de uma inclinação maior do que a inclinação verdadeira do campo magnético. Usando a inclinação verdadeira no termo *icos* ( $I$ ), a anomalia terá formas reduzidas ao pólo de fato (apenas com magnetização induzida). Porém, se  $I'$  for maior que  $I$  no processamento dos dados, uma correção de amplitude exagerada será evitada.

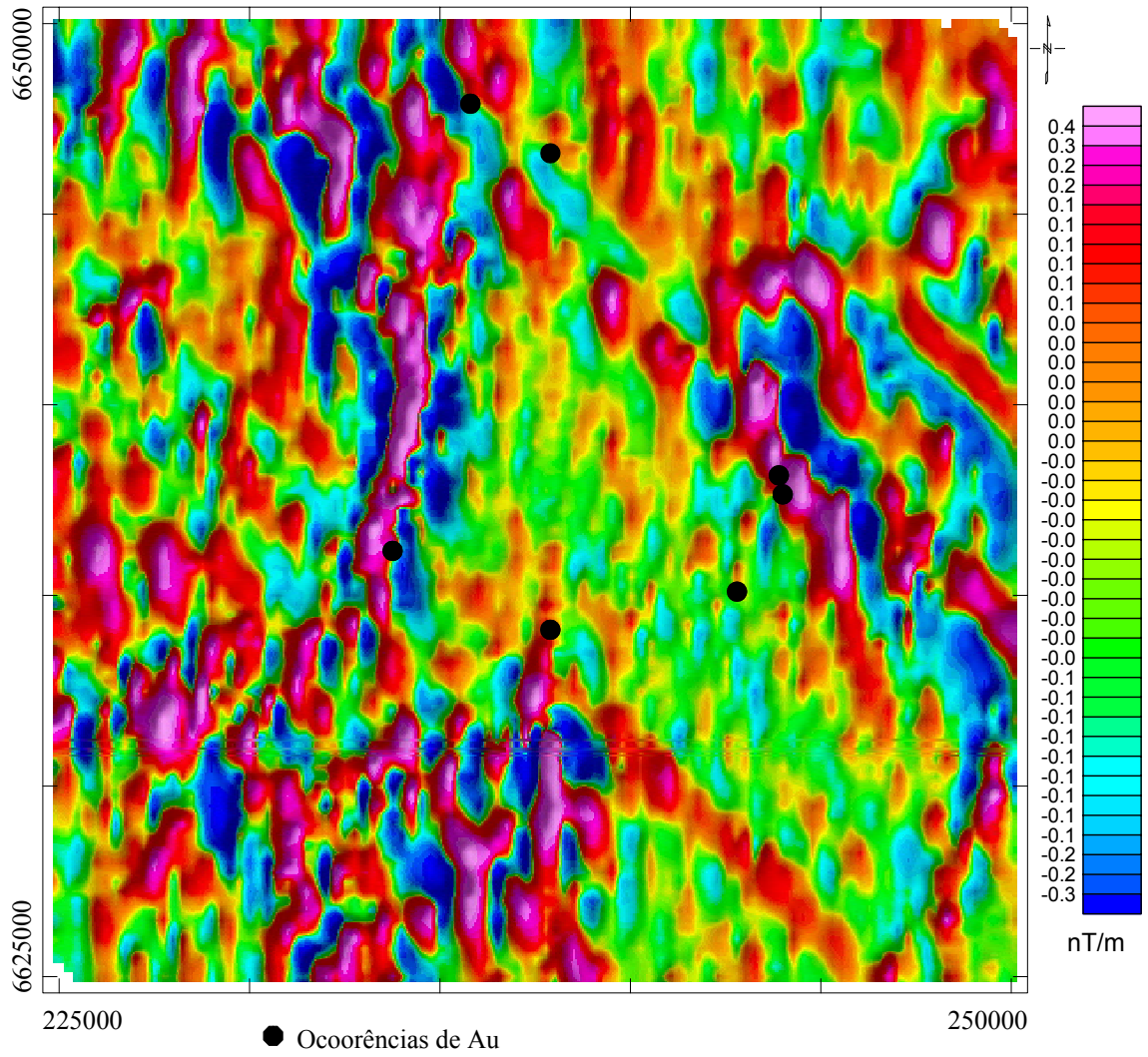
Embora a correção de amplitude do operador de redução ao pólo possa ser controlada, os resultados ainda serão inválidos para corpos magnetizados remanescentes, segundo Macleod *et al.* (1993).

As Figuras 4.7 e 4.8 representam as imagens de primeira e segunda derivada vertical reduzidas ao pólo da região do Complexo Bossoroca.

Os parâmetros utilizados para inclinação ( $I$ ) e declinação ( $D$ ), nesse trabalho, foram:

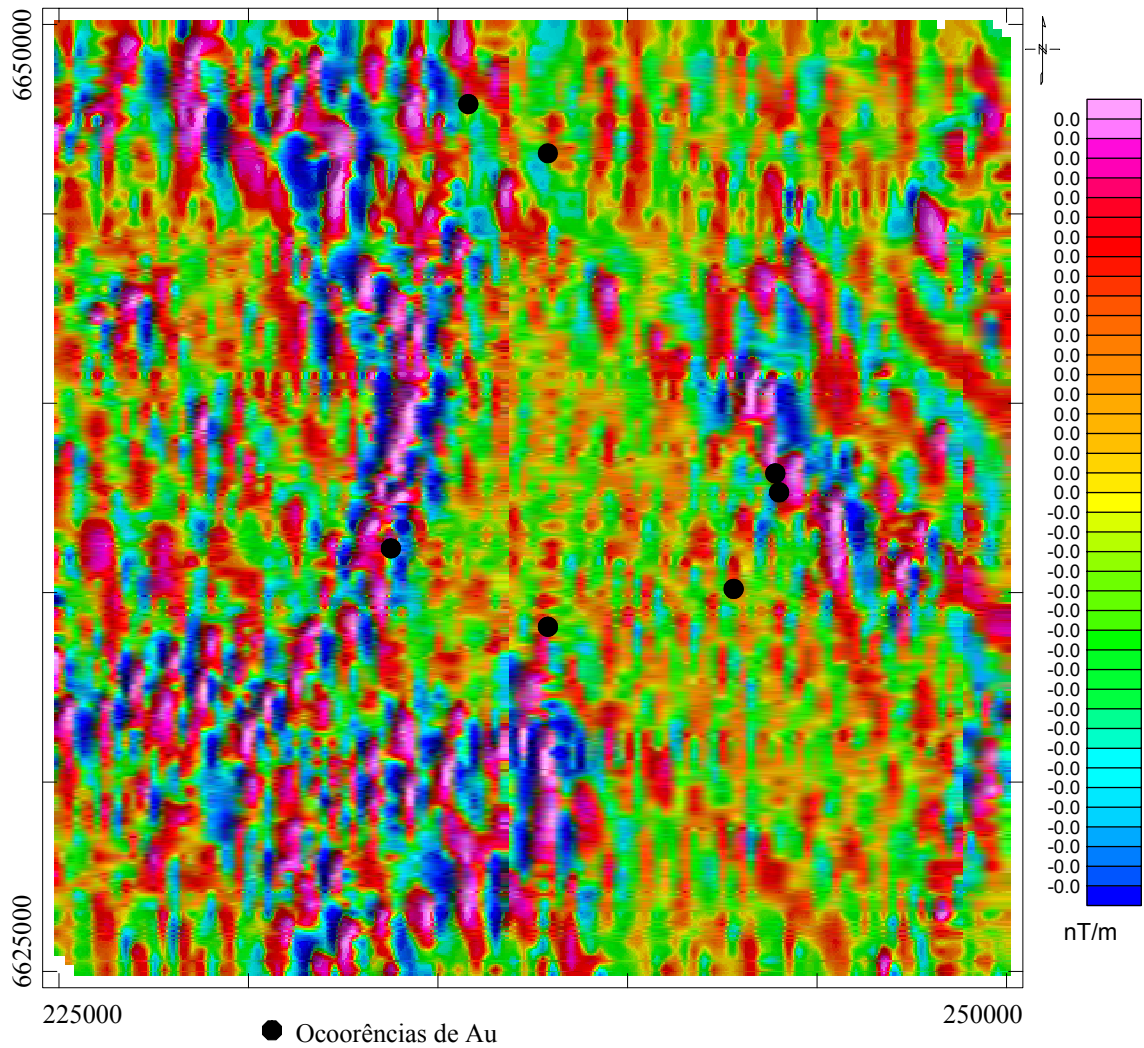
Inclinação =  $-29^{\circ} 26'$

Declinação =  $-8^{\circ} 21'$



Cor	Pseudocoloração
Método de Coloração	Padrão
Inclinação	45°
Declinação	135°
Fator de Escala Vertical	100

Figura 4.6. Imagem da primeira derivada vertical campo magnético anômalo e suas principais características de realce.



Cor	Pseudocoloração
Método de Coloração	Padrão
Inclinação	45°
Declinação	135°
Fator de Escala Vertical	100

Figura 4.7. Imagem da segunda derivada vertical reduzida ao pólo do campo magnético anômalo e suas principais características de realce.

#### 4.10.5 Sinal analítico

Nabighian (1972) *apud* Macleod *et al.* (1993) desenvolveram a noção de sinal analítico, ou envelope de energia, de anomalias magnéticas. Uma importante característica do sinal analítico é que ele independe da direção de magnetização da fonte. A amplitude do sinal

analítico está simplesmente relacionada na amplitude de magnetização. Roest *et al.* (1992), mostraram que a amplitude do sinal analítico pode ser derivada da seguinte expressão:

- $|A(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial z}\right)^2}$

onde  $M$  é o campo magnético observado e  $(x, y$  e  $z)$ , os três gradientes ortogonais do campo magnético total, com IGRF removido

Nabighian (1972) também mostrou que o sinal analítico direciona-se para os limites do corpo magnético. Isto pode ser mostrado integrando verticalmente o campo magnético total.

A imagem das amplitudes do sinal analítico obtido a partir do mapa de integral vertical determina parâmetros geométricos, como localização de limites (geológicos e estruturais) e profundidade dos corpos (Nabighian 1972). As amplitudes do sinal analítico têm como vantagem não depender dos parâmetros do campo magnético terrestre e da direção de magnetização da fonte, e sua principal característica é o posicionamento das amplitudes resultantes imediatamente acima dos limites da estrutura.

#### 4.10.6 Integração Vertical

É um filtro disponível no Geosoft<sup>®</sup> que calcula a integral vertical do campo, onde é o inverso da derivada vertical (Geosoft, 1999).

A equação para a integral vertical é:

- $L(r) = \frac{1}{r}$

Este filtro é muito utilizado em conjunto com o sinal analítico. Macleod *et al.* (1993) calcularam a amplitude do sinal analítico da integral vertical calculada do campo magnético total na região de *greenstone belt* de Crixás, Goiás, obtendo excelentes resultados. A Figura 4.10 mostra a integral vertical do campo magnético anômalo da região do Complexo Bossorooca.

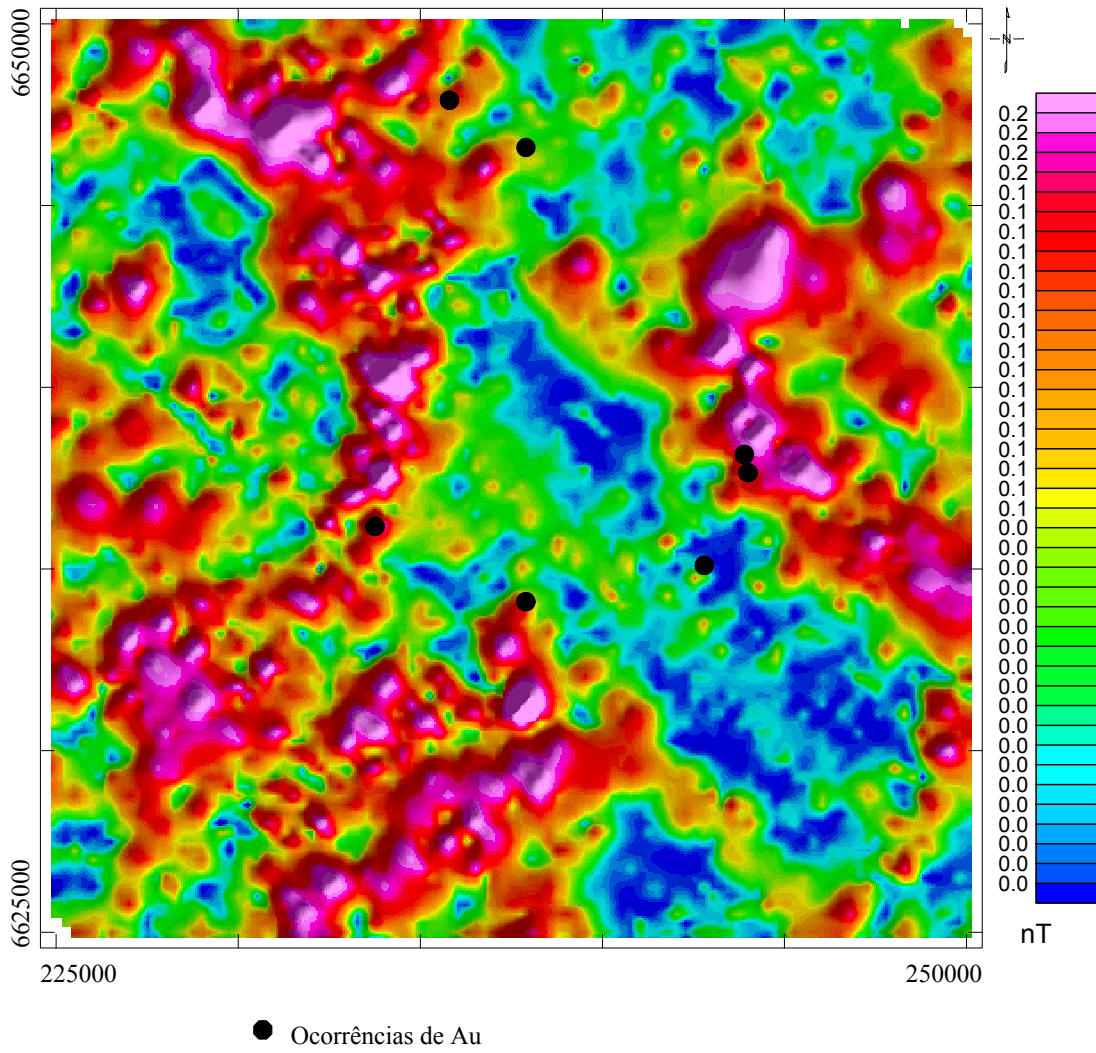


Figura 4.8. Imagem em pseudocoloração do sinal analítico do campo magnético anômalo.

Cor	Pseudocoloração
Método de Coloração	Padrão
Inclinação	45°
Declinação	135°
Fator de Escala Vertical	100



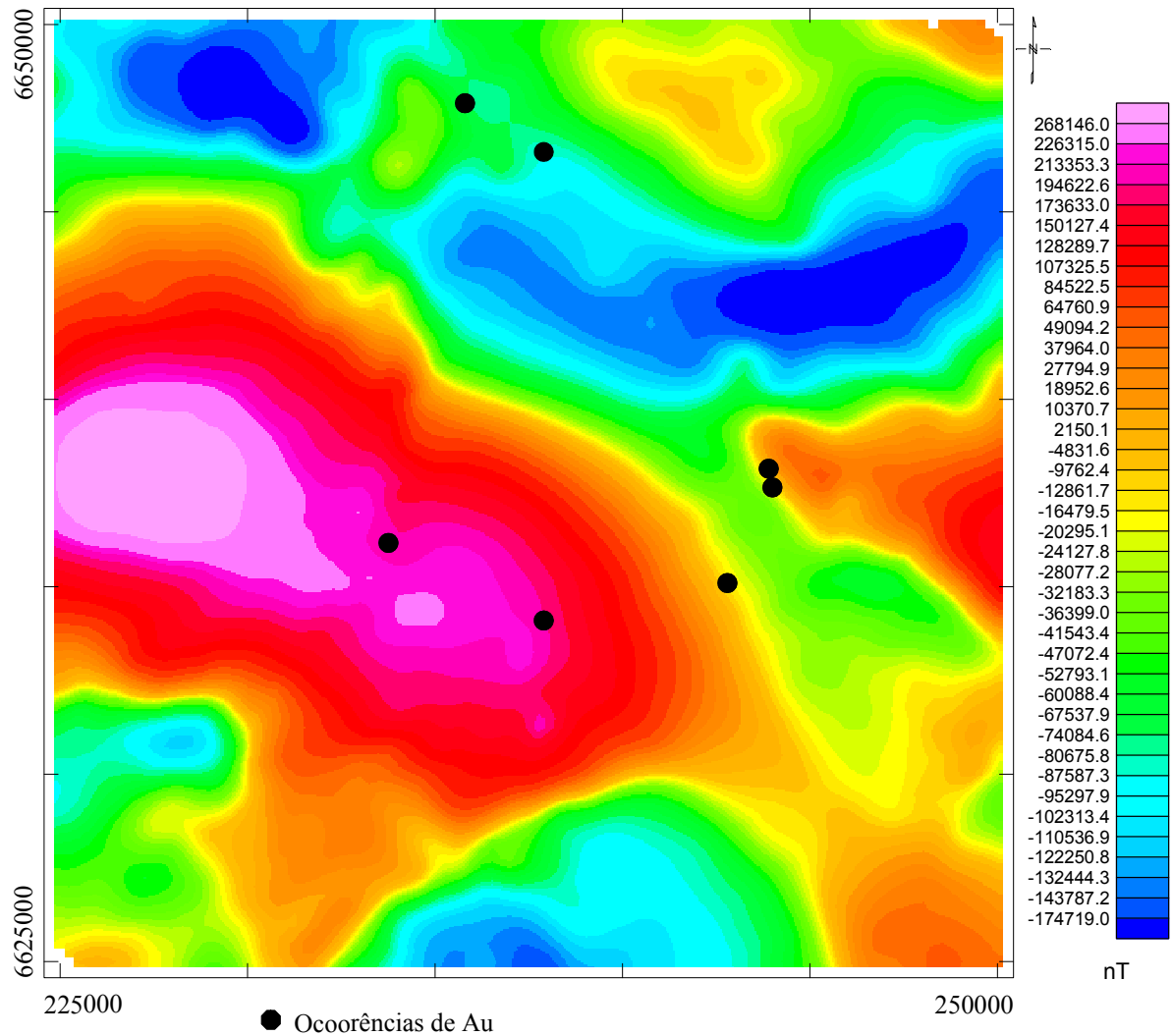


Figura 4.9. Imagem em pseudocoloração da integral vertical do campo magnético anômalo

#### 4.10.7 Gradiente Horizontal

O gradiente horizontal do campo magnético anômalo indica mudanças laterais das propriedades físicas das derivadas horizontais e tende a revelar picos acima dos limites das fontes causadoras de anomalias (Blum, 1999). Os filtros são utilizados para criação de imagens sombreadas (Geosoft, 1999). A malha do gradiente horizontal foi gerada a partir das malhas das derivadas horizontais de “x” (Figura 4.11) e “y” (Figura 4.12). Sua magnitude é dada por:

$$\bullet \quad h(x, y) = \sqrt{\left[ \left( \frac{\partial G_z(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial G_z(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right]}$$

onde a magnitude do gradiente horizontal é a raiz quadrada da soma dos quadrados das derivadas parciais de um campo potencial  $G_z(x,y)$  em relação a  $x$  e a  $y$ .

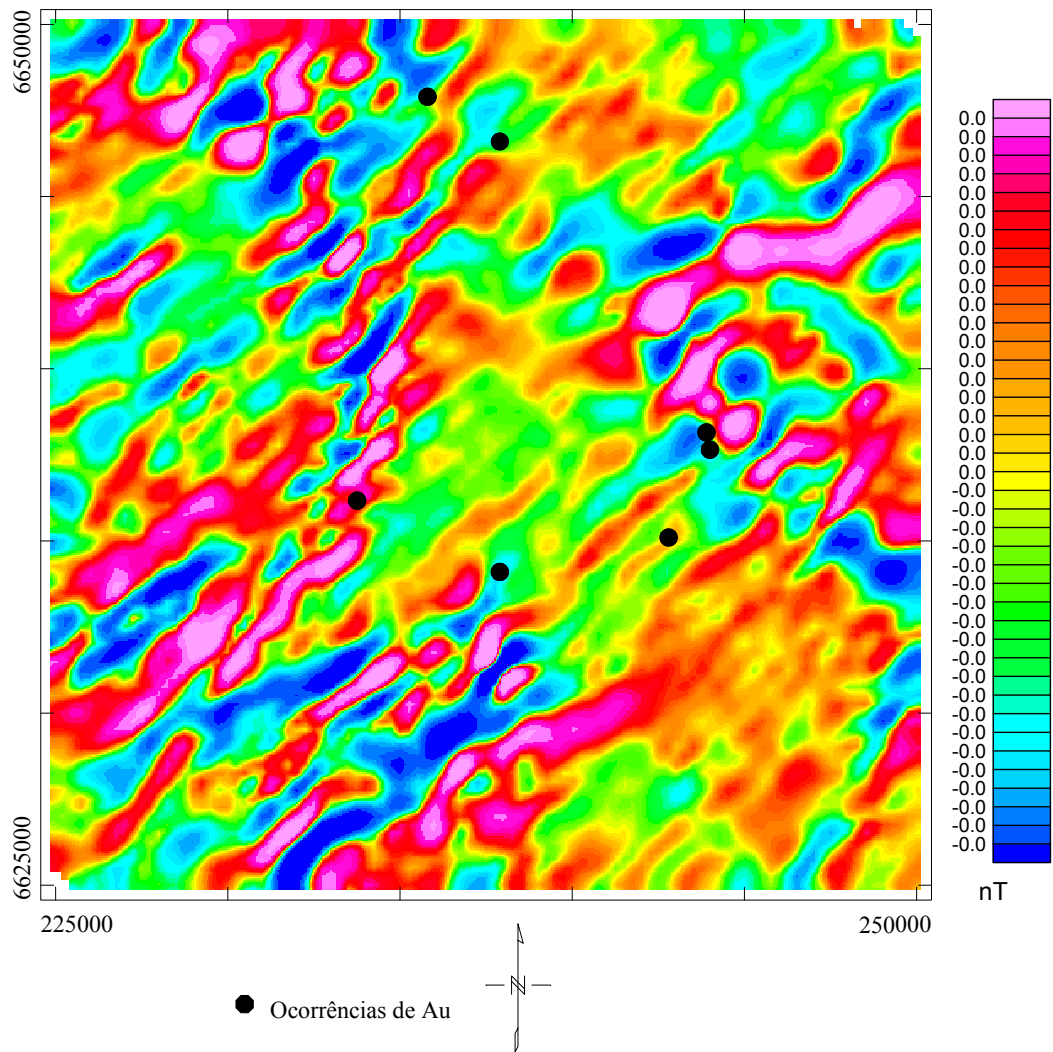


Figura 4.10. Gradiente horizontal na direção N-S do campo magnético anômalo.

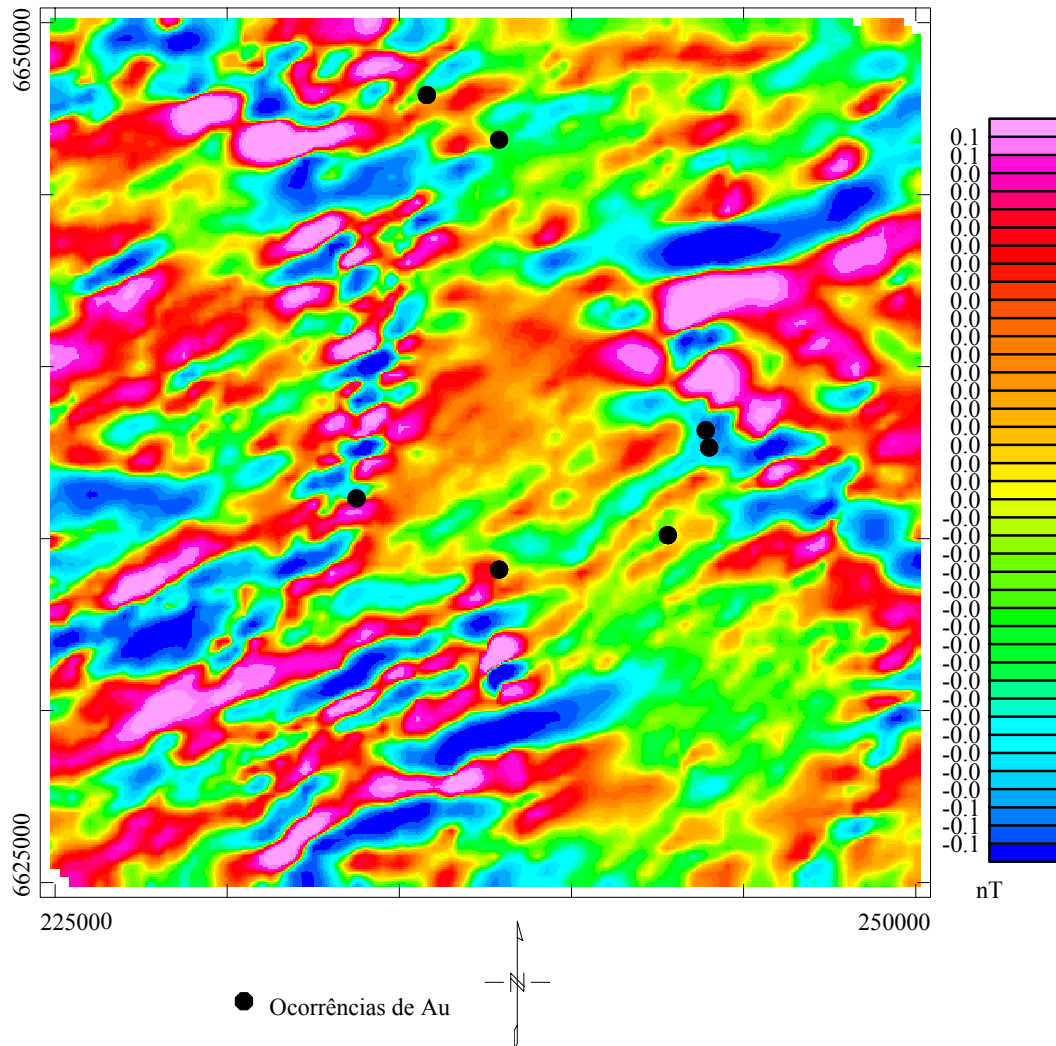


Figura 4.11. Gradiente horizontal na direção E-W do campo magnético anômalo.

#### 4.10.8 Realce através de mapa de contorno

A interferência provocada no campo geomagnético pelas rochas da crosta terrestre produz perturbações locais que são característicos por diferentes relevos magnéticos, em função da suscetibilidade magnética das rochas. Quanto maior a concentração de minerais magnéticos mais acentuado torna-se o relevo magnético. Desta maneira, as rochas sedimentares apresentam relevos magnéticos suaves. As rochas ígneas com magnetita produzem um relevo magnético acidentado (negativo ou positivo). Os alinhamentos magnéticos podem aparecer como interrupção de altos e baixos magnéticos, mudança de gradiente e padrões de contorno em linhas retas. Foram gerados mapas de contorno para o

campo magnético anômalo (Figura 4.13), segunda derivada vertical (Figura 4.14), integral vertical (Figura 4.15).

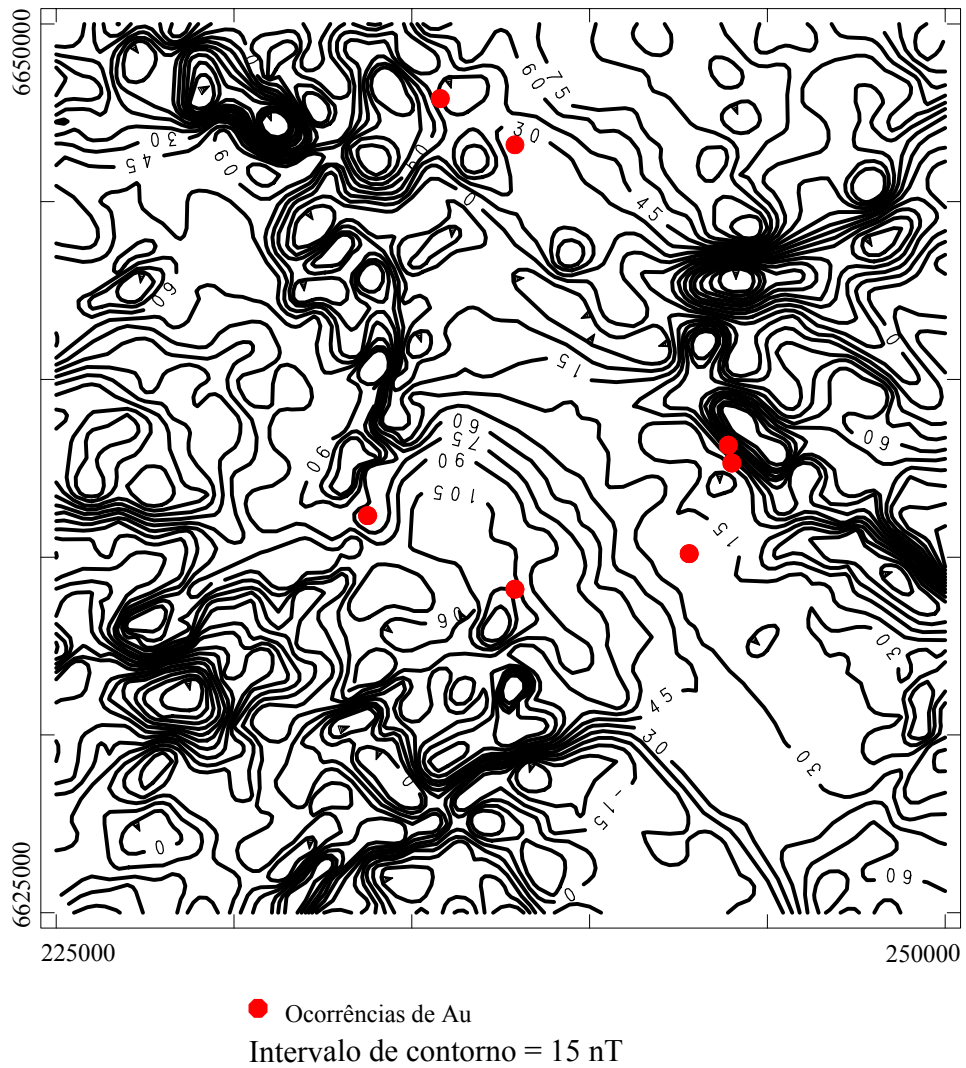


Figura 4.12. Mapa de contorno do campo magnético anômalo.

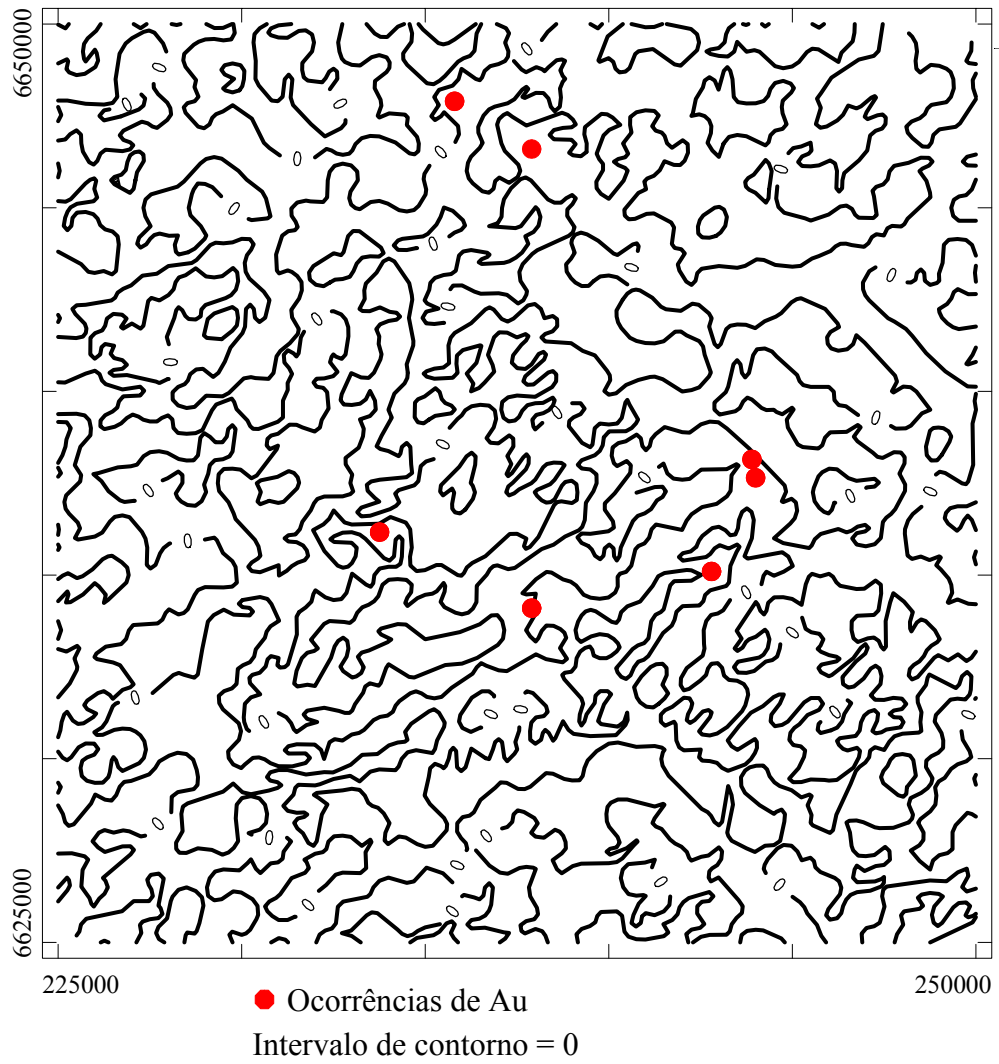


Figura 4.13. Mapa de contorno da segunda derivada vertical do campo magnético anômalo.

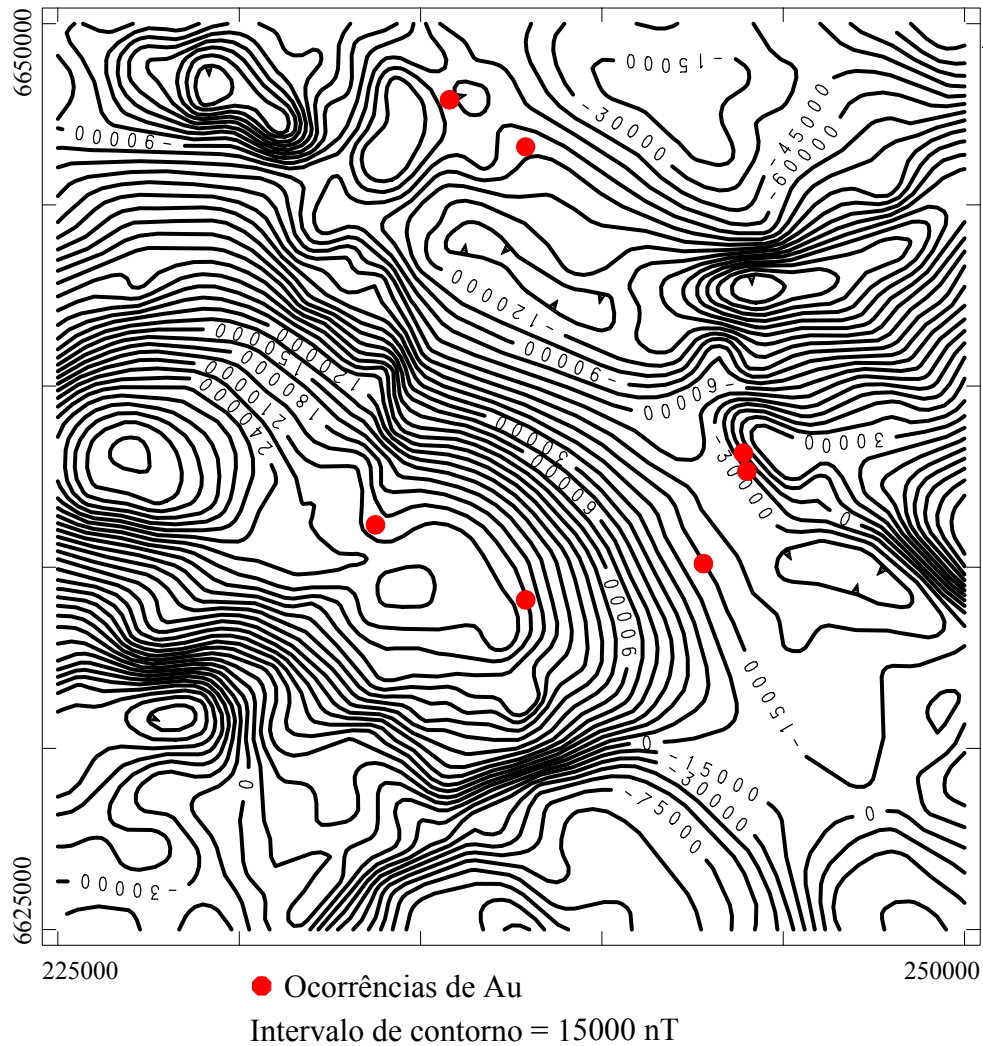


Figura 4.14. Mapa de contorno a integral vertical do campo magnético anômalo.

#### 4.10.9 Realce por sombreado e tons de cinza

Geralmente são utilizados quando os mapas possuem grande quantidade de detalhes relacionados às fontes mais rasas. Fontes mais profundas geradoras de anomalias de maior comprimento de onda, normalmente não são bem representadas por imagens. Imagens com tons de cinza e iluminação artificial são muito úteis para mapeamento de detalhes, principalmente de feições lineares. Testes através da pseudoiluminação associado ao relevo sombreado proporcionaram mapear os principais lineamentos nos mapas aeromagnéticos e aeroaerogamaespectrométricos. Utilizou-se para este fim, as técnicas de pseudoiluminação de inclinação e declinação nos ângulos  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$ , com tonalidades variando na escala

do cinza *default*, distribuição normal, histograma de normalização, linear e log-linear. As Figuras 4.16 e 4.17 representam mapas com relevo sombreado e tons de cinza do campo magnético anômalo e do gradiente residual da derivada vertical em  $y$  (direção N-S).

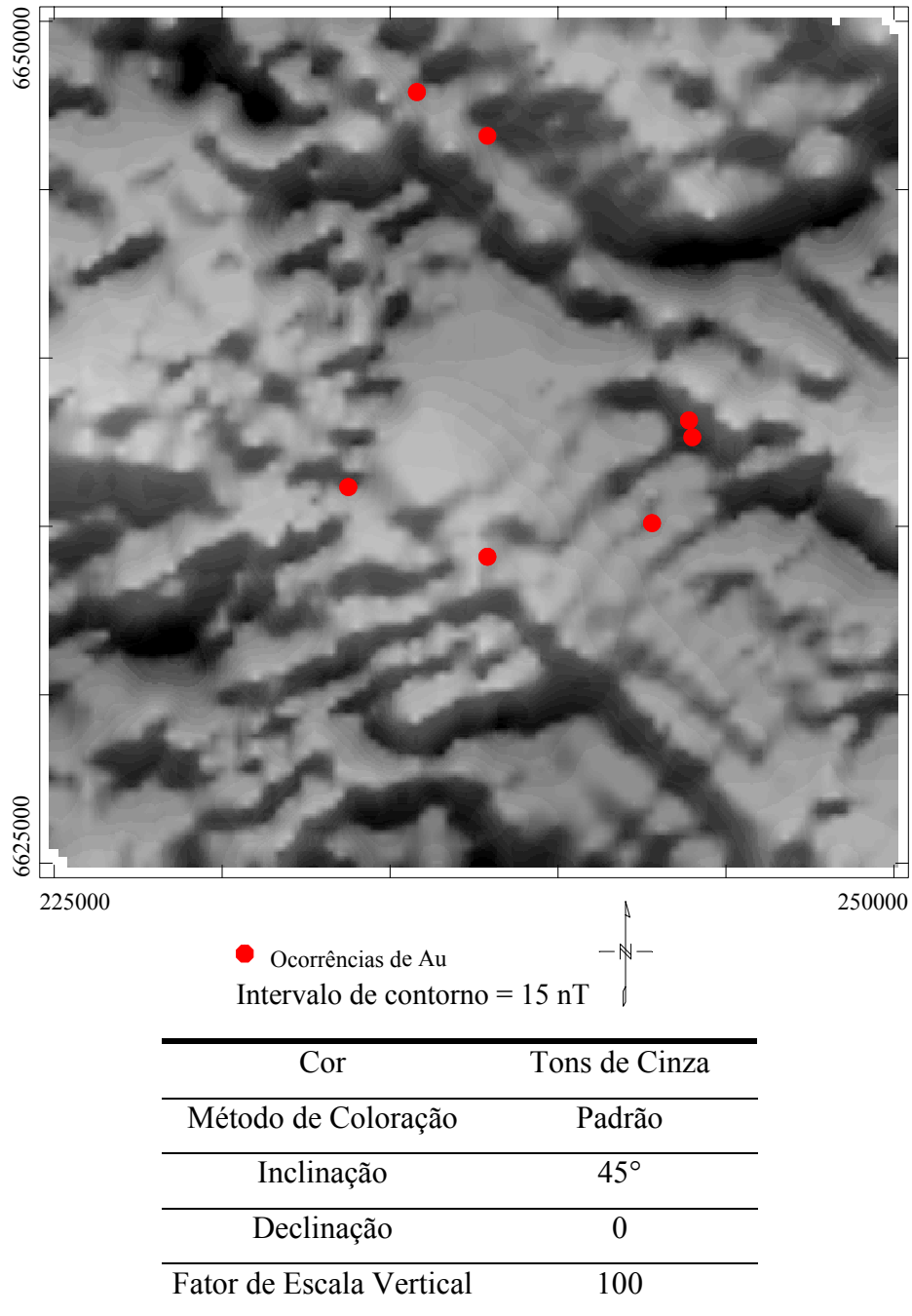
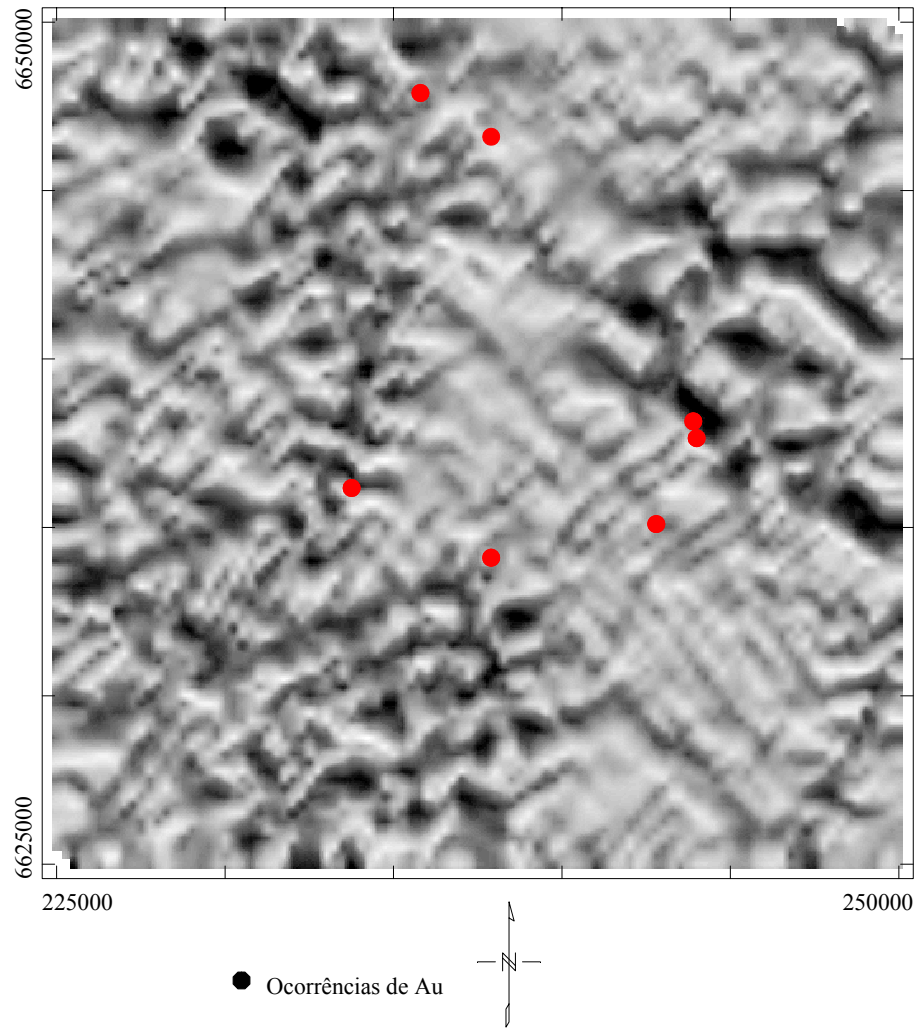


Figura 4.16. Imagem do campo magnético anômalo em tons de cinza e suas principais características de realce.



Cor	Tons de Cinza
Método de Coloração	Padrão
Inclinação	45°
Declinação	135°
Fator de Escala Vertical	100

Figura 4.17. Imagem do gradiente horizontal na direção N-S do campo magnético anômalo em tons de cinza e suas principais características de realce.



## 4.11 Processamento de dados aeroaerogamaespectrométricos

Esta etapa do trabalho consistiu na eliminação dos ruídos e artefatos causados pelo aerolevanteamento, levando em consideração o nivelamento feito previamente pela CPRM e pelo CNEN, onde os dados foram corrigidos do efeito Compton, do *background* atmosférico, do tempo morto e da correção altimétrica. Esses artefatos e ruídos foram micronivelados e confeccionados mapas nos canais de contagem total, potássio, eU, e eTh; suas razões eTh/K, eU/eTh e eU/K; potássio e urânio anômalos e parâmetro  $F$ .

### 4.11.1 Micronivelamento

Após transformar os dados em malhas regulares com espaçamento de 1/4 das linhas de vôo interpolados pelo método de mínima curvatura, foi aplicado o método de decorrugação (micronivelamento) nos dados aeroaerogamaespectrométricos.

Para se evitar problemas do tipo *aliasing*, foi feito micronivelamento nos dados aeroaerogamaespectrométricos de contagem total, eTh, K e eU, através do seguinte método:

- Transformação dos dados para o domínio da frequência;
- Análise do espectro 2D, visando a escolha da frequência de corte com filtro passa-baixa (Figura 4.18);
- Aplicação do filtro do tipo passa-baixa nos dados de eTh, K e eU e contagem total, com frequências de corte 0.0015 ciclos/metro para eTh, K e eU, 0.001 ciclos/metro para contagem total.
- Filtragem do tipo cosseno direcional, no canal de eU com grau da função cosseno 0.5 todos rejeitando as direções das linhas de vôo.

Porcher *et al.* (1995), salientam que o mapa gerado do canal de urânio oriundo do Projeto Passo do Salsinho, apresenta-se "estirado" na direção NE-SW, devido a problemas na geração do *malha regular* inicial decorrente dos baixos valores registrados pelo canal de urânio. Esse problema também foi identificado nos mapas de urânio nesse trabalho.

Fuck (2000), comenta que nem sempre o micronivelamento fornece resultados satisfatórios tanto por limitações matemáticas dos filtros como pela natureza dos erros residuais de um conjunto de dados onde há grande variação de valores. Outro problema é a incapacidade do micronivelamento distinguir entre anomalias reais que estejam paralelas às linhas de vôo e erros residuais que se deseja eliminar. Após a decorrugação foram eliminados

valores negativos de contagem de radiação gama, para tornar o menor valor do conjunto de dados igual a zero, pois não se verificam, fisicamente, valores negativos.

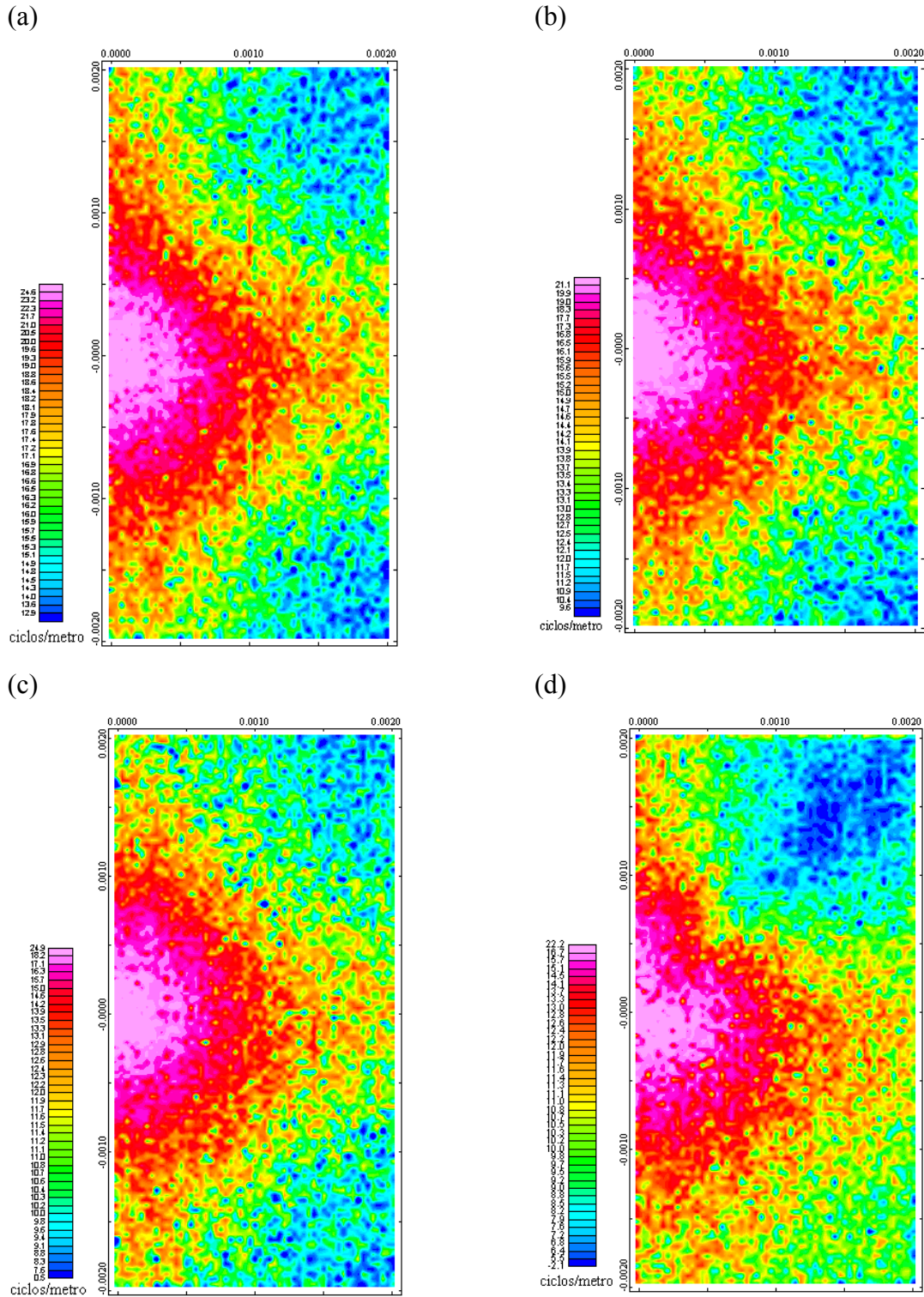


Figura 4.18. Espectro de potência 2D dos mapas de contagem total (a), potássio (b), tório (c) e urânio (d) da região do Complexo Bossoroca.

Partindo dos dados corrigidos, foram confeccionados mapas visando a interpretação qualitativa dos dados aeroaerogamaespectrométricos do Complexo Bossoroça através de mapas individuais dos canais de eU, eTh, K e Contagem Total; imagens compostas de eU/eTh, eTh/K e eU/K; mapas ternários K: eU: eTh, nos padrões de cores RGB (*Red, Green, Blue*) e CMY (*Cyan, Magenta, Yellow*); potássio/urânio anômalos e parâmetro *F*.

#### **4.11.2 Mapas dos canais de contagem total, potássio, equivalente tório e equivalente urânio**

Foram confeccionados os três principais tipos de mapas para cada canal individualmente, na forma de mapas com relevo sombreado pseudocolorido e tons de cinza e na forma de mapas de contorno, para a região do Complexo Bossoroça. Desta maneira, foi possível averiguar os principais lineamentos sob os diferentes aspectos, bem como no auxílio aos mapas ternários na geração de um mapa com as unidades gamaespectrométricas.

#### **4.11.3 Contagem total**

As Figuras 4.19 a 4.21 representam o canal de contagem total nos mapas de contorno, pseudocolorido e tons de cinza sombreado, respectivamente. Pode-se identificar as principais litologias da região do Complexo Bossoroça e os principais lineamentos que compõem este canal. Os principais lineamentos encontram-se nas direções NE-SW preferencialmente e secundariamente E-W e NW-SE.

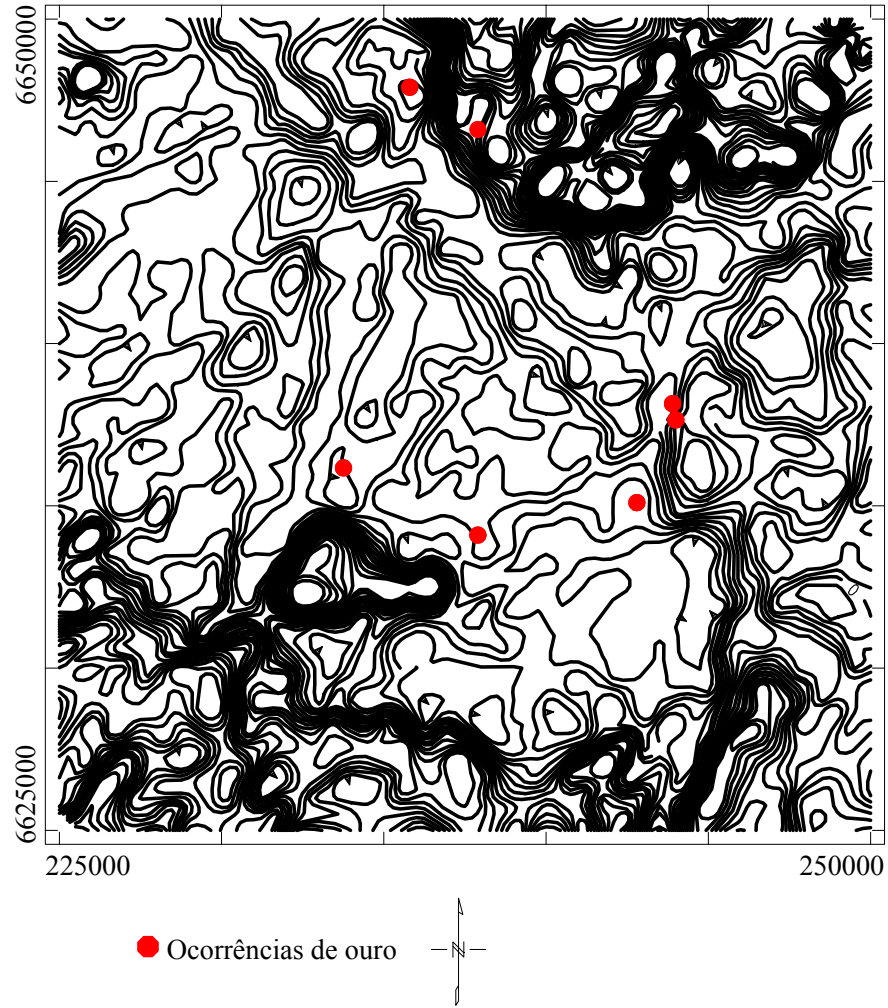
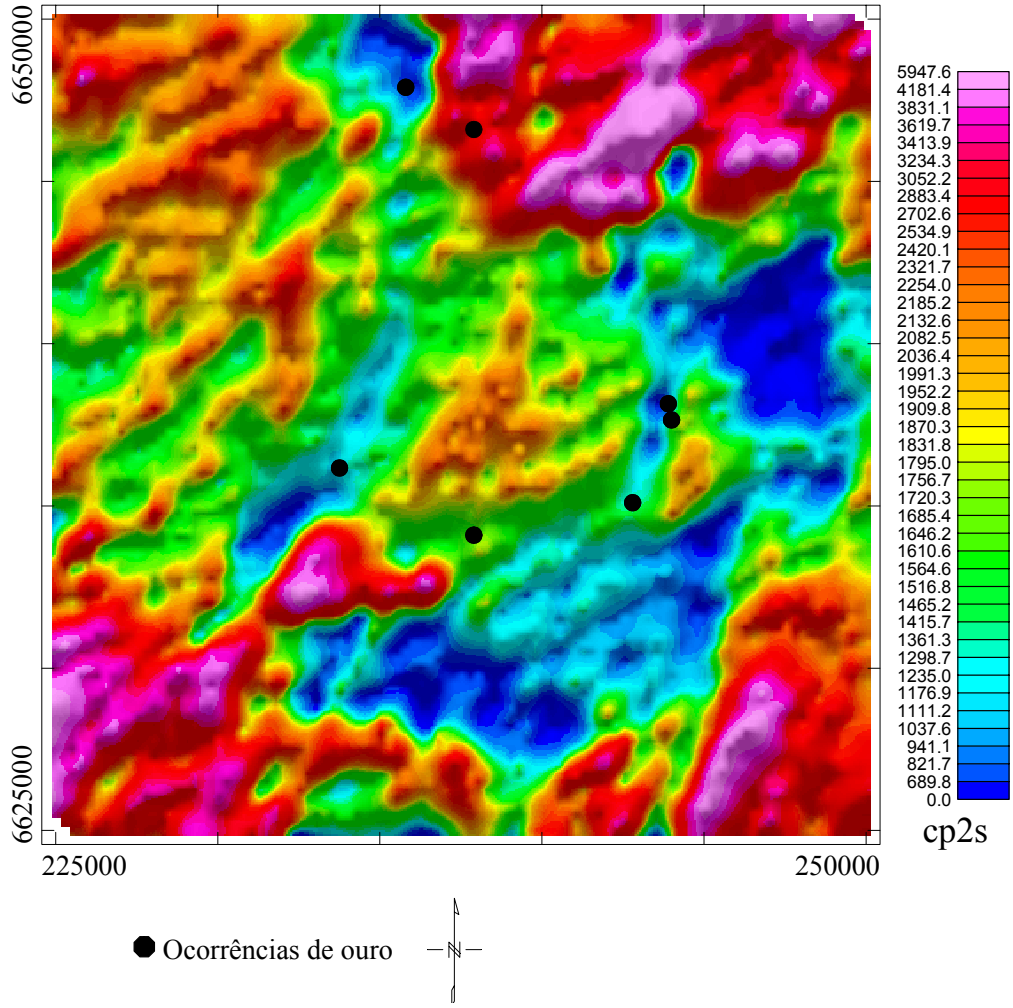


Figura 4.19. Mapa de contorno de contagem total da região do Complexo Bossoroca.



Cor	Pseudocoloração
Método de Coloração	Padrão
Inclinação	45°
Declinação	135°
Fator de Escala Vertical	100

Figura 4.20. Imagem em pseudocoloração de contagem total e suas principais características de realce.

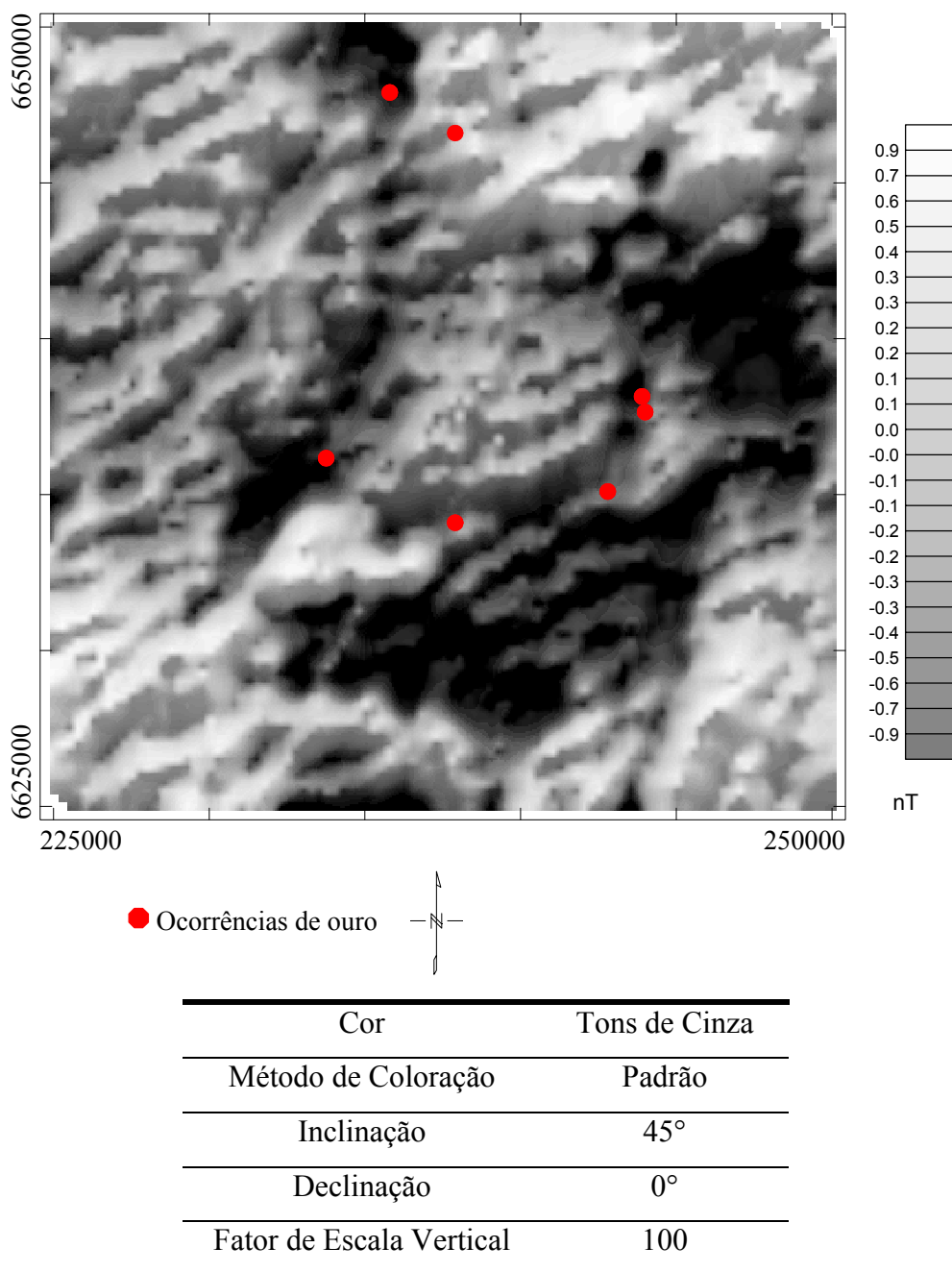


Figura 4.21. Imagem em tons de cinza de contagem total da região do Complexo Bossoroca.

#### 4.11.4 Potássio

As Figuras 4.22 a 4.24 salientam os teores de potássio nas principais litologias da região do Complexo Bossoroca, ressaltando, rochas que apresentam teores elevados, como granitos, rochas vulcânicas ácidas e intermediárias, bem como metassedimentos ricos em potássio. Estruturas maiores como limites litológicos e principais lineamentos (falhas, por exemplo) com direção NE-SW principalmente podem ser visualizados.

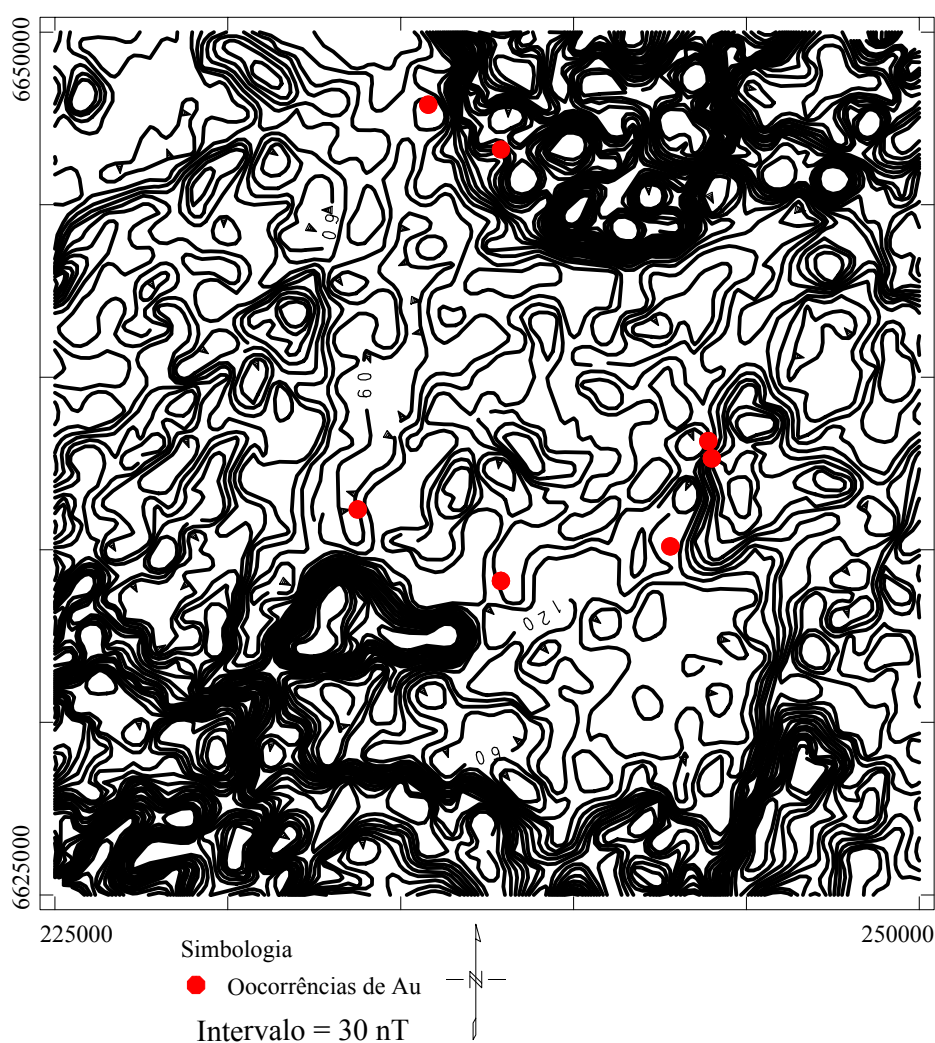
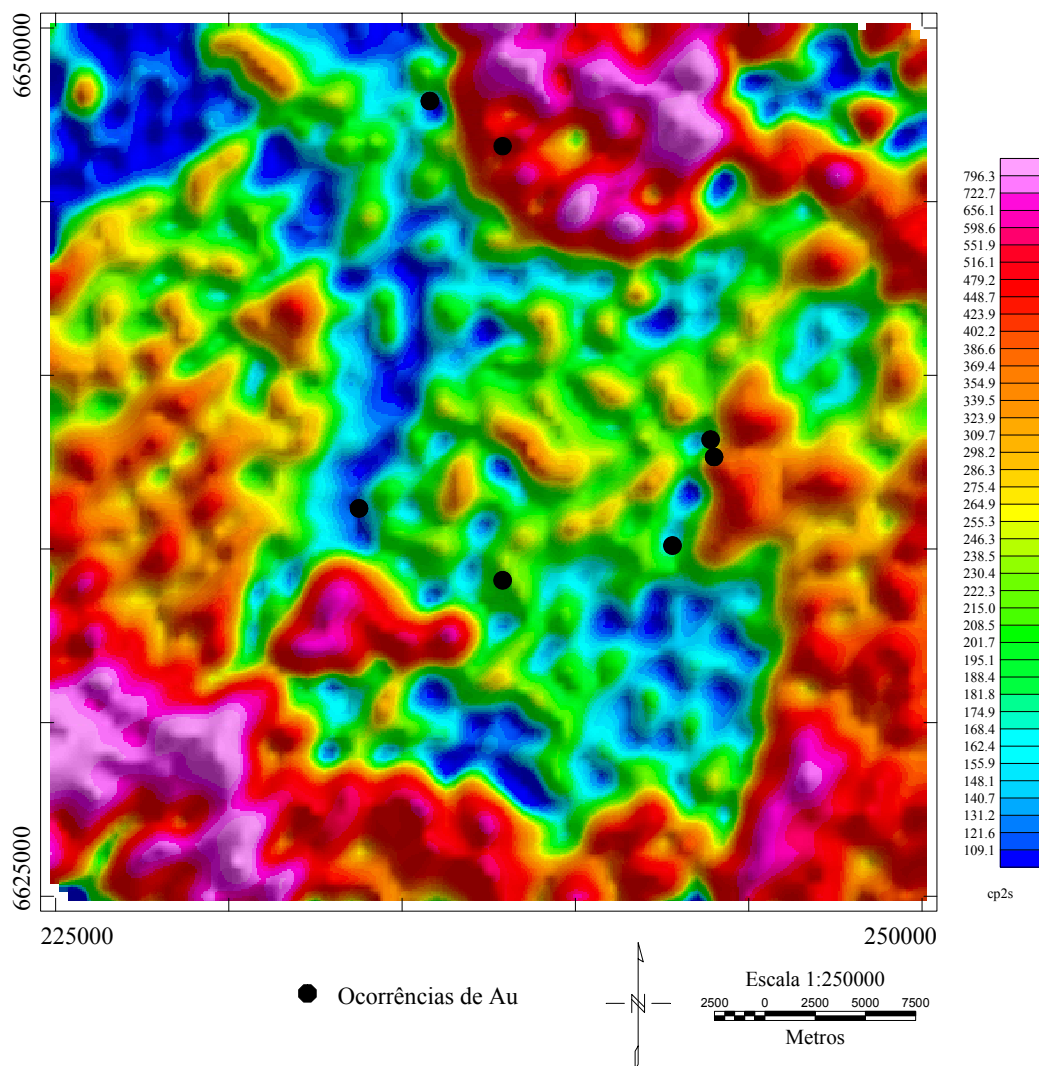


Figura 4.22. Mapa de contorno do canal de potássio.



Cor	Pseudocoloração
Método de Coloração	Padrão
Inclinação	45°
Declinação	45°
Fator de Escala Vertical	100

Figura 4.23. Imagem em pseudocoloração do canal de potássio e suas principais características de realce.



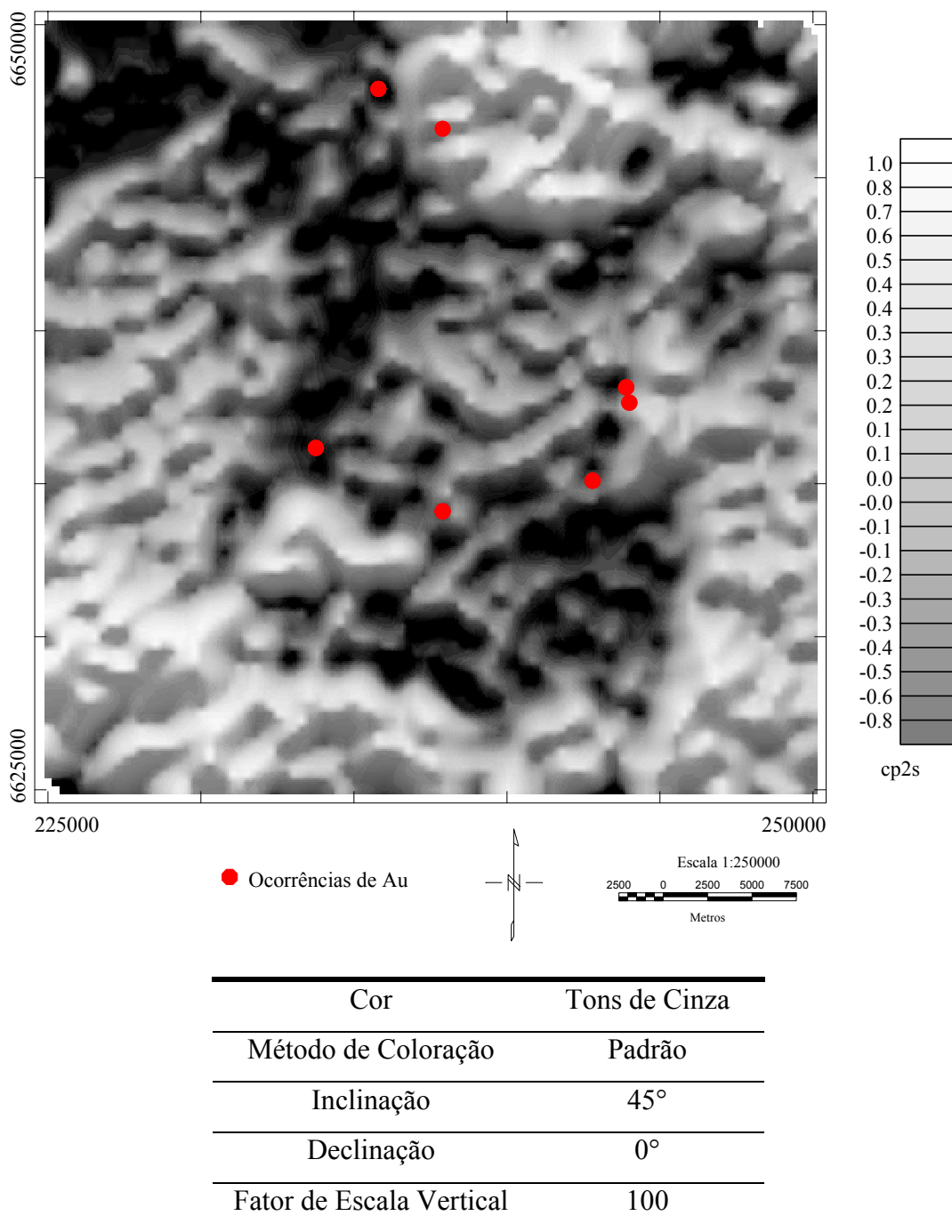


Figura 4.24. Imagem em tons de cinza do canal de potássio e suas principais características de realce.

#### 4.11.5 Equivalente tório

As imagens do canal de tório, Figuras 4.25 a 4.27, das litologias da região do Complexo Bossoroca que possuem os maiores teores de equivalente tório, como rochas ácidas, granitóides, rochas vulcânicas ácidas e metassedimentos ricos em tório. Podemos

notar que baixos teores de equivalente tório encontram-se em locais por onde passam drenagens (ver Figura 2.2); ressaltando litologias máficas-ultramáficas (Complexo Pedras Pretas e Formação Passo Feio, por exemplo), ou podendo representar locais onde há mata galeria.

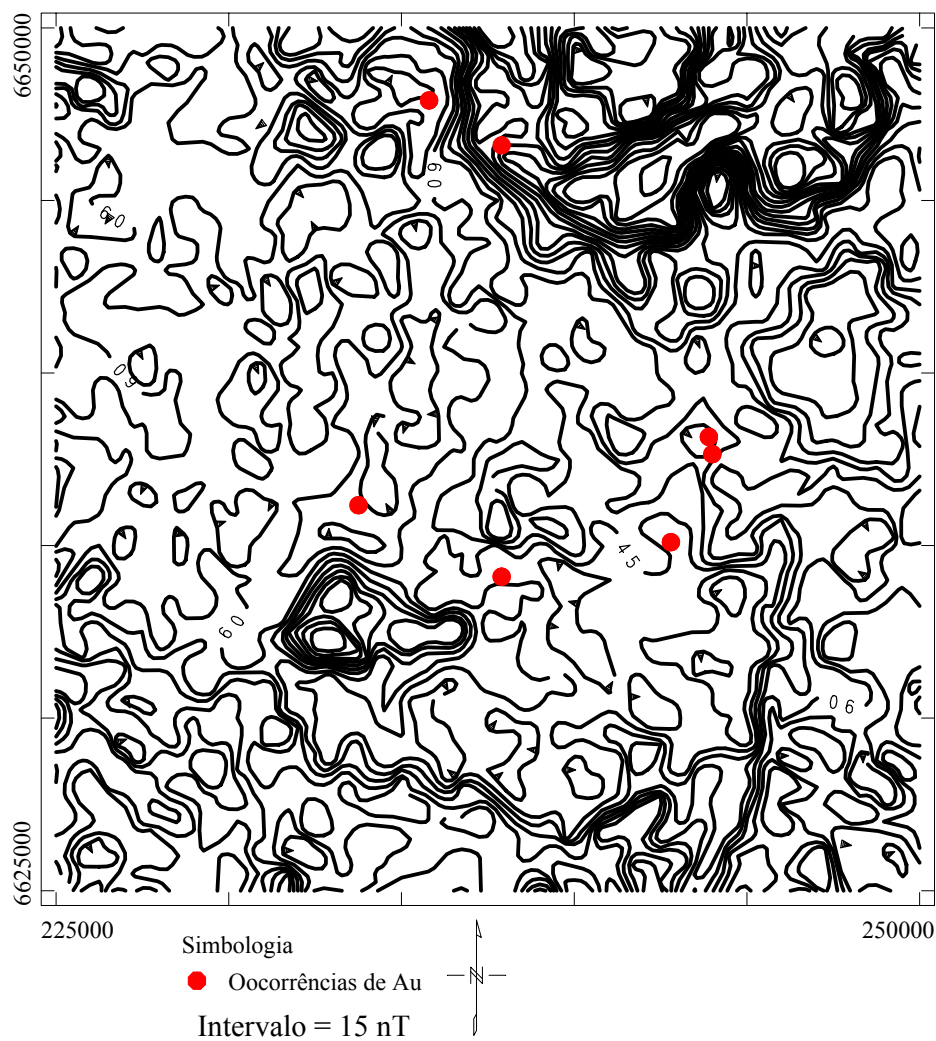
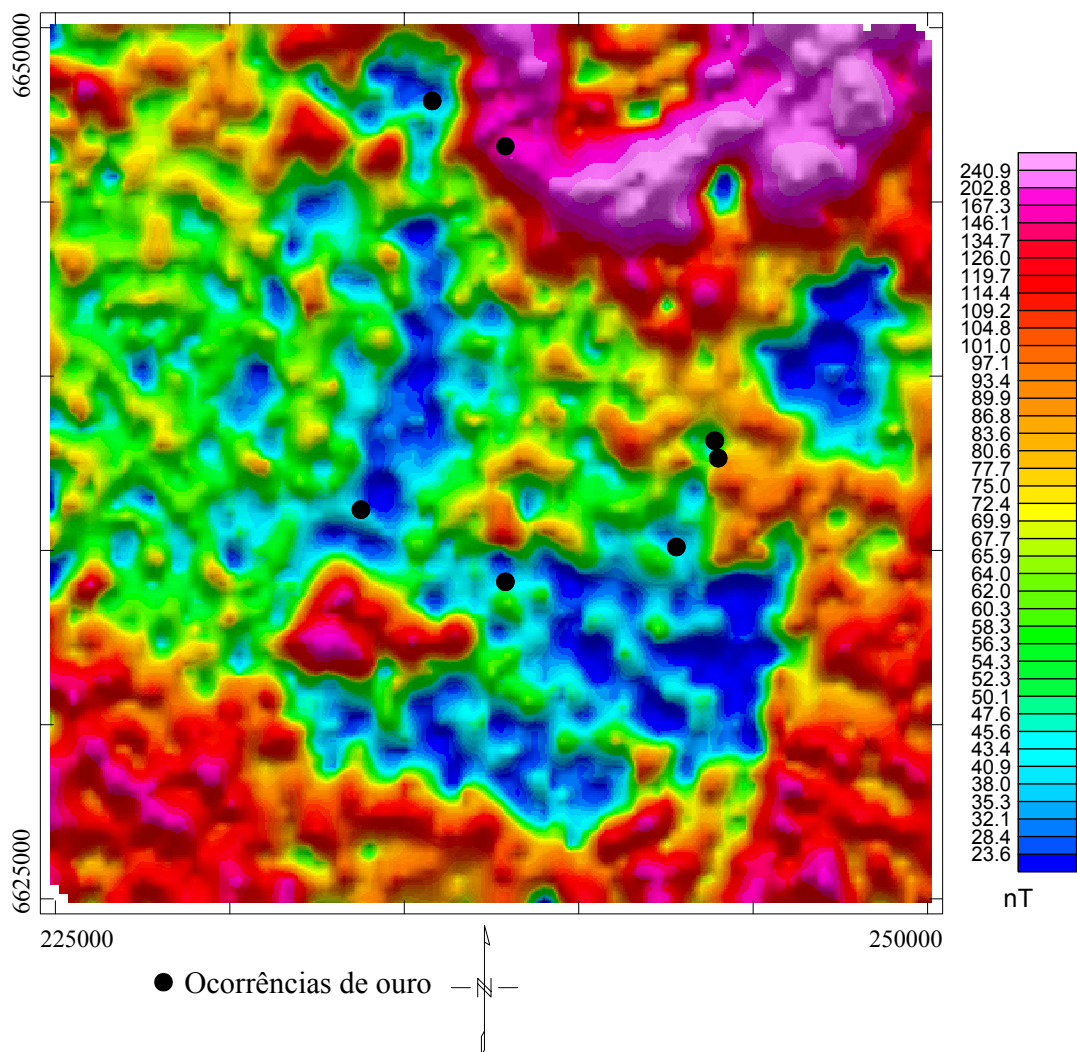
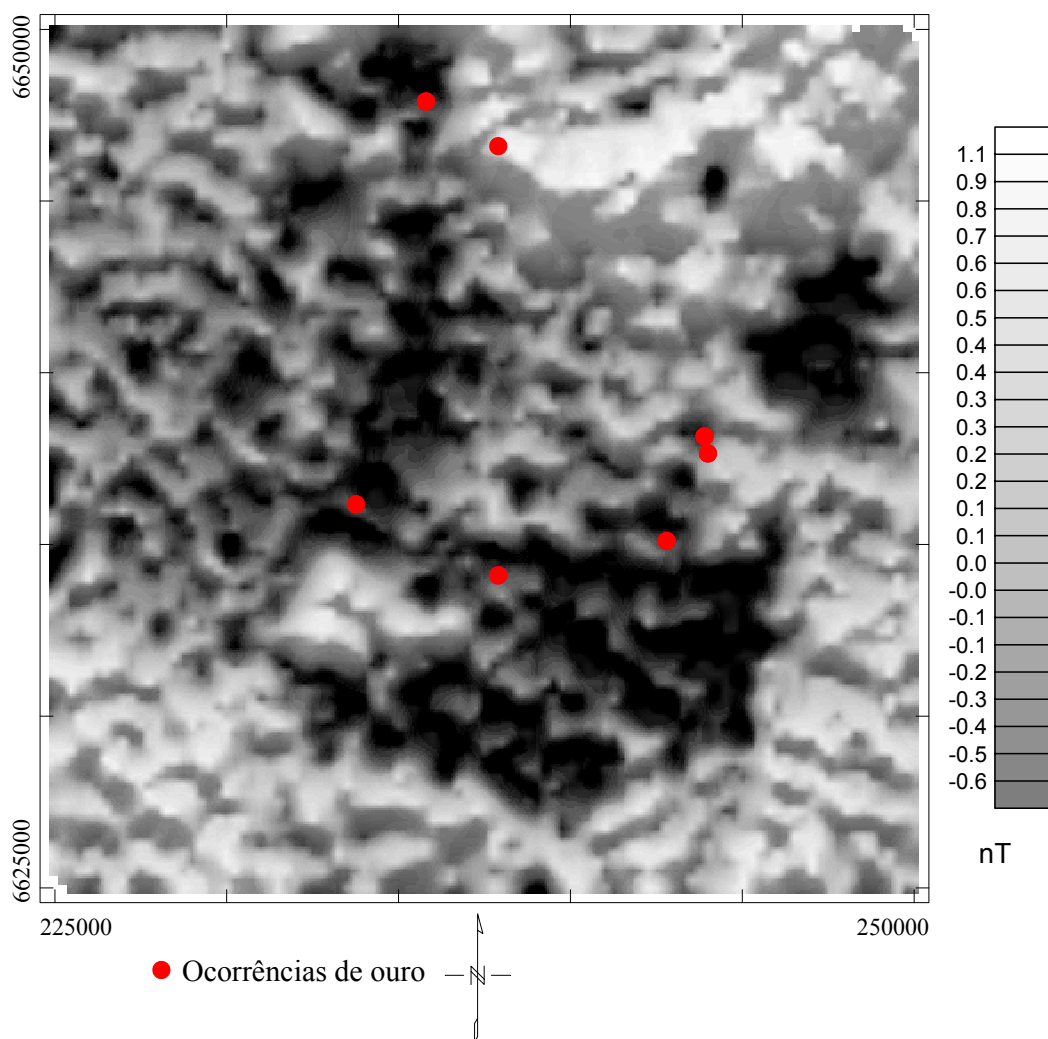


Figura 4.25. Mapa de contorno de eTh.



Cor	Pseudocoloração
Método de Coloração	Padrão
Inclinação	45°
Declinação	0°
Fator de Escala Vertical	100

Figura 4.26. Imagem em pseudocoloração no canal de eTh e suas principais características de realce.



Cor	Tons de Cinza
Método de Coloração	Padrão
Inclinação	45°
Declinação	45°
Fator de Escala Vertical	100

Figura 4.27. Imagem em tons de cinza do canal de eTh e suas principais características de realce.

### 4.11.6 Equivalente urânio

As Figuras 4.28 a 4.30 representam os teores de equivalente urânio na região do Complexo Bossoroca, onde valores elevados correspondem a solos de litologias de composição ácida, tais como granitóides tardi a pós orogênicos; metagranitóides (Complexo Cambaí, por exemplo); metassedimentos de composição vulcânica ácida a intermediária (Sedimentos vulcânicos da Bacia do Camaquã e da Sequência Campestre) e sedimentos ricos em urânio (rochas sedimentares da Bacia do Paraná).

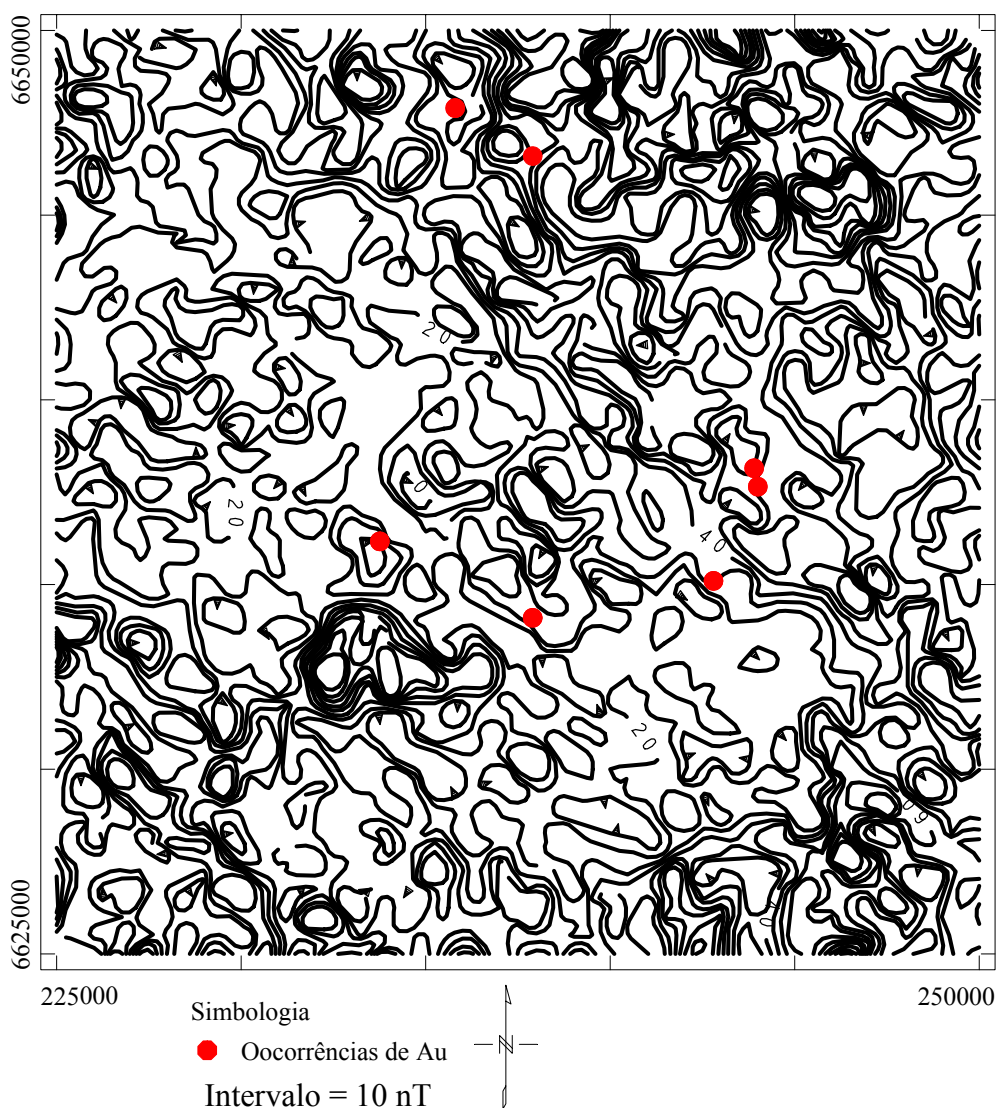


Figura 4.28. Mapa de contorno do canal de eU.

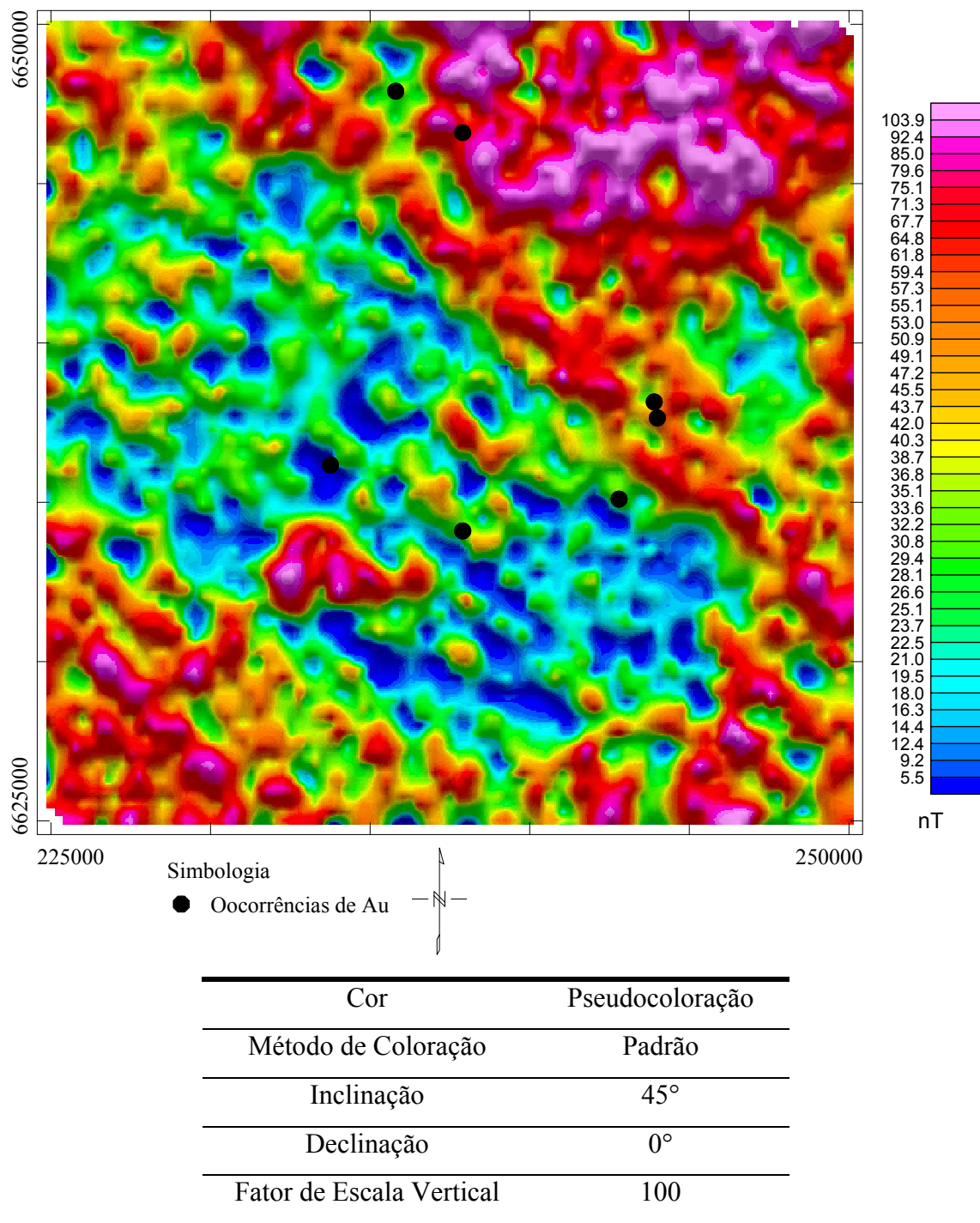


Figura 4.29. Imagem em pseudocoloração do canal de eU e suas principais características de realce.

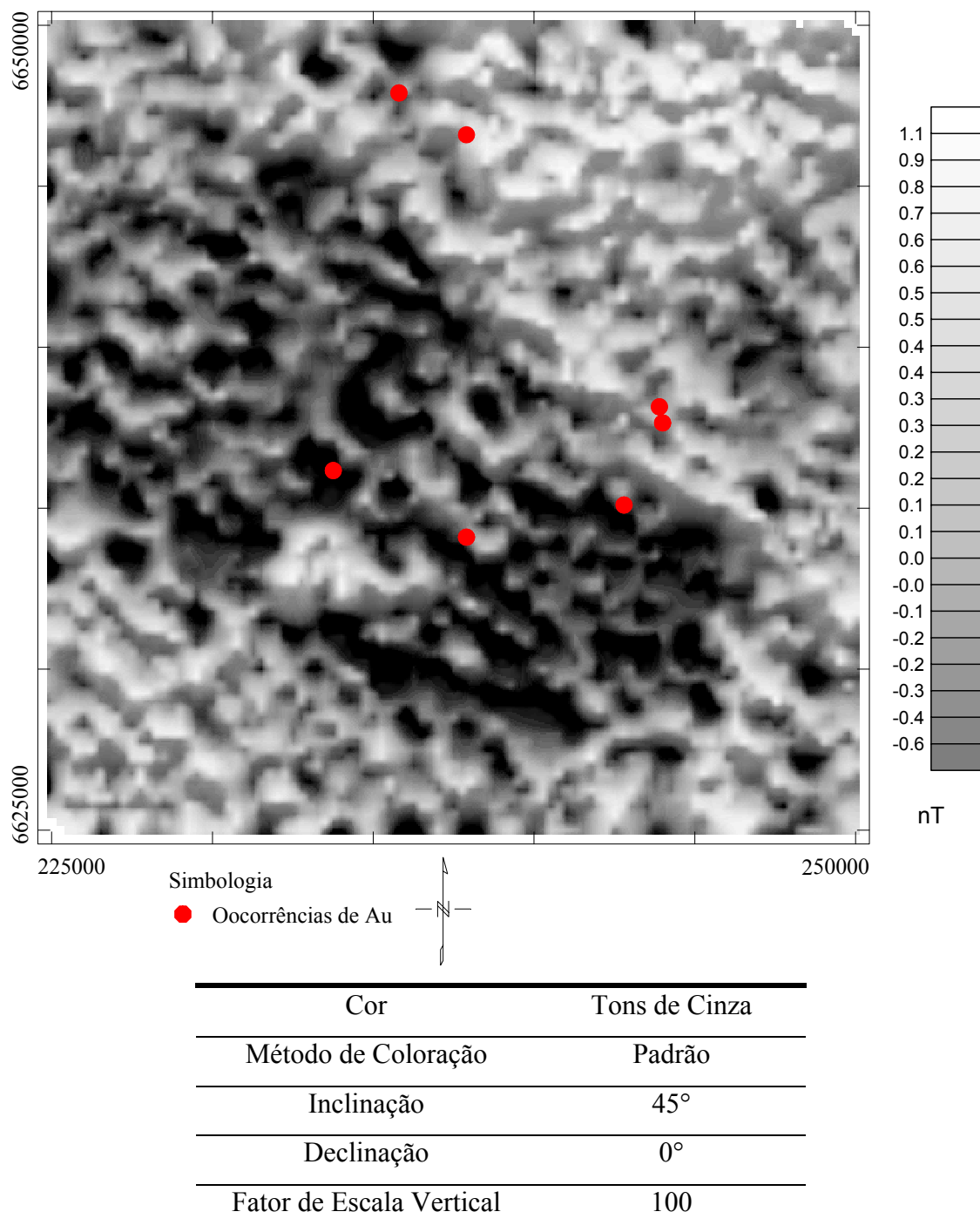


Figura 4.30. Imagem em tons de cinza do canal de eU e suas principais características de realce.

#### 4.11.7 Mapas de razões eTh/K, eU/eTh e eU/K

As imagens das razões entre os três principais elementos são extremamente úteis por serem menos afetadas pela geometria da fonte e pela variabilidade superficial dos elementos individuais, (Carvalho, 1999). Os mapas foram utilizados no auxílio tanto na compreensão das

unidades gamaespectrométricas e conseqüentemente no mapeamento geológico, quanto na definição de zonas com concentrações anômalas de potássio, podendo indicar processos hidrotermais. As imagens das razões  $eTh/K$ ,  $eU/eTh$  e  $eU/K$  estão representadas nas Figuras 4.31 a 4.33, respectivamente.

Todos os mapas com relevo sombreado pseudocolorido apresentam as seguintes características: inclinação:  $45^\circ$  ( $135^\circ$  para razão  $eTh/K$ ); declinação:  $45^\circ$  e fator de escala vertical: 100.

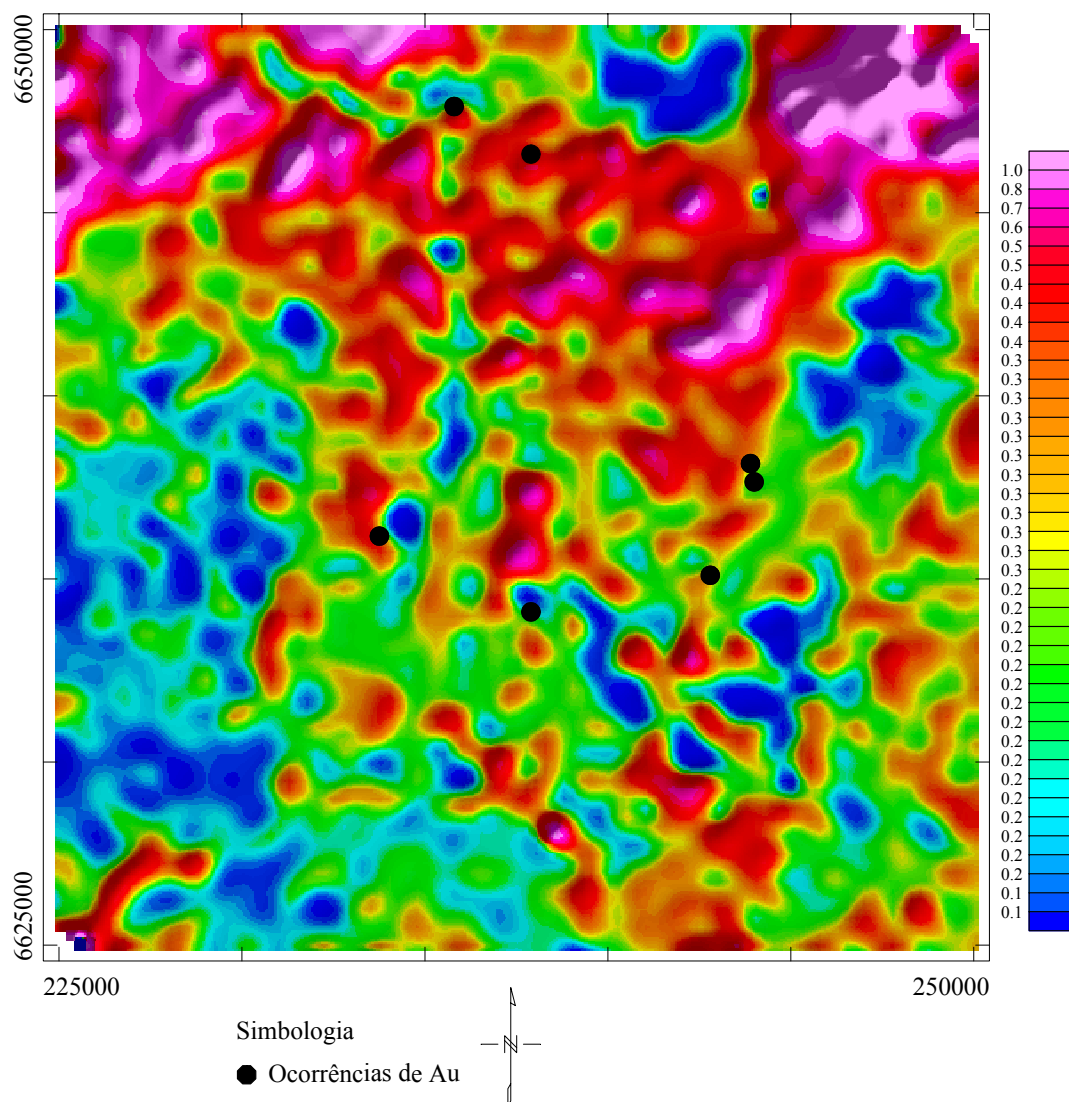


Figura 4.31. Imagem em pseudocoloração da razão  $eTh/K$ . Características de realce idem Figura 4.20.



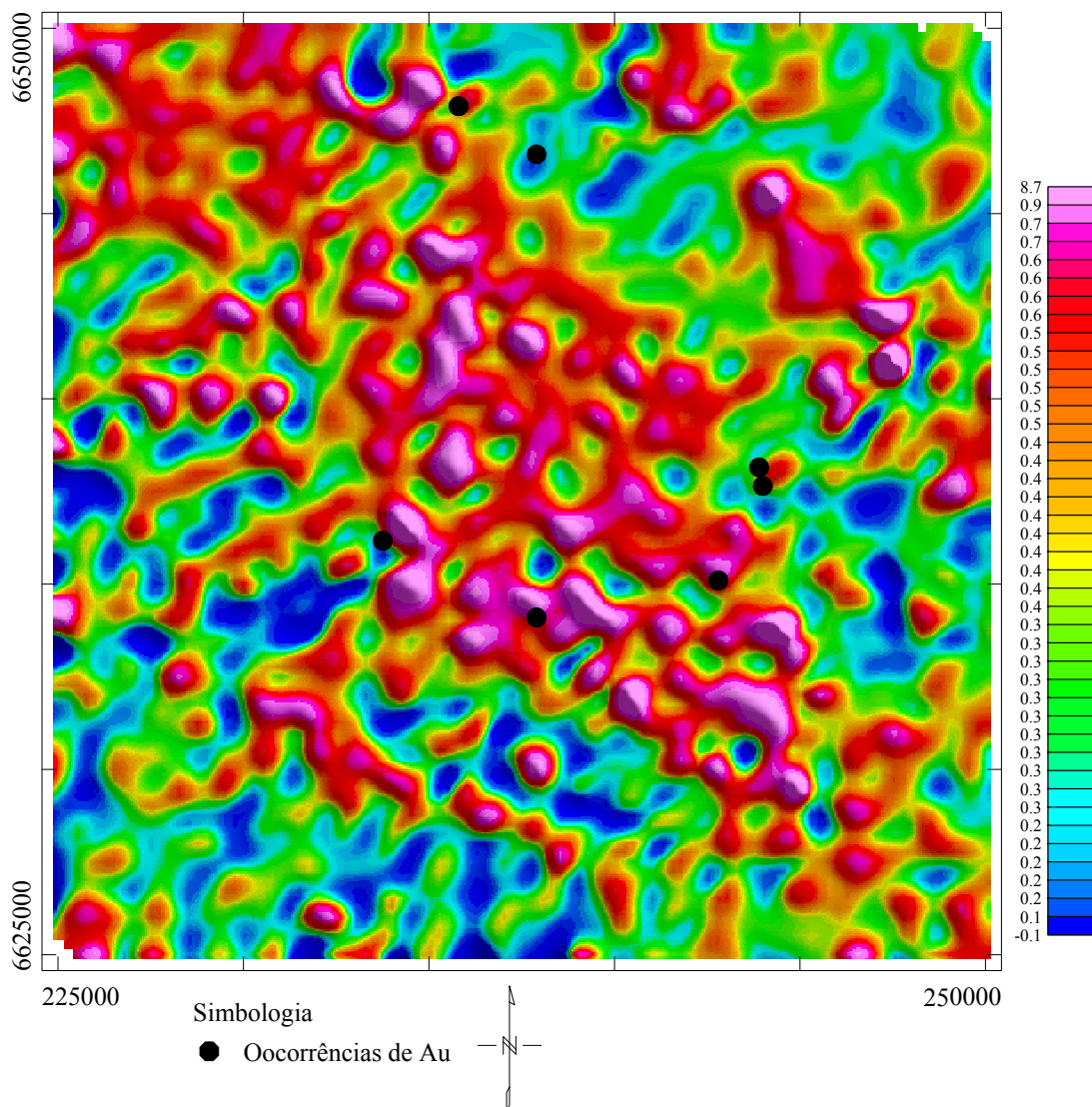


Figura 4.32. Imagem em pseudocoloração da razão  $eU/eTh$  e suas principais características de realce.

Cor	Pseudocolorido
Método de Coloração	Padrão
Inclinação	45°
Declinação	0°
Fator de Escala Vertical	100

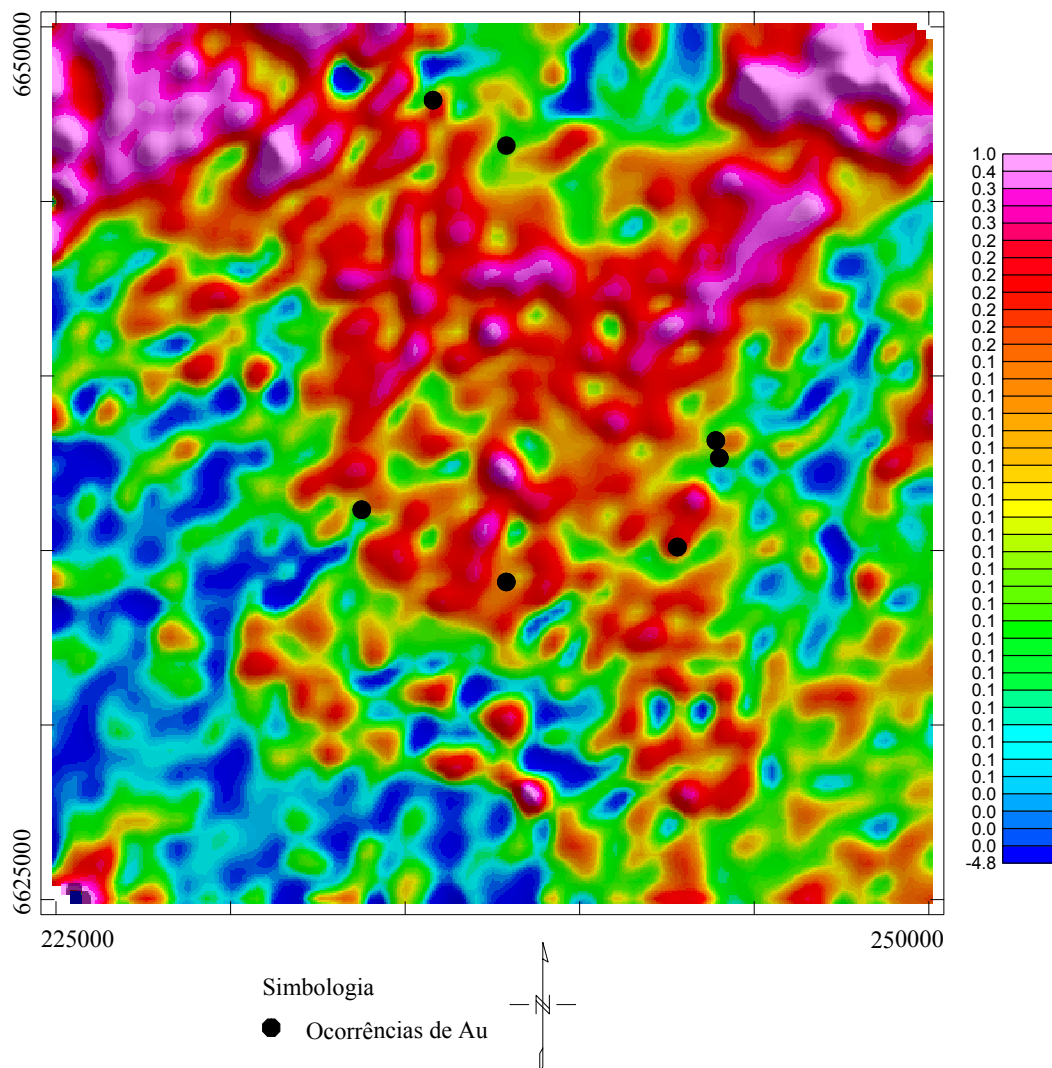


Figura 4.33. Imagem em pseudocoloração da razão eU/K e suas principais características de realce.

Cor	Pseudocolorido
Método de Coloração	Padrão
Inclinação	45°
Declinação	0°
Fator de Escala Vertical	100

#### 4.11.8 Mapas ternários

As imagens ternárias representam as contribuições relativas dos elementos primários (tório, potássio e urânio) em uma única imagem, mostrando suas variações nas concentrações nos diferentes conjuntos litológicos. A combinação desses elementos permite a caracterização

geológica das principais unidades através dos padrões de caracterização RGB, (potássio no vermelho, tório no verde e urânio no azul) e no padrão CMY, (potássio no ciano, tório na cor magenta e urânio da cor amarelo). A Figura 4.34 representa a imagem ternária no padrão RGB e a Figura 4.35 a imagem ternária no padrão CMY para a região do Complexo Bossoroça. Parro (1998) notou que ao realizar o processamento no padrão RGB, a composição de cores ocasionou uma perda de resolução, ao passo que no padrão CMY houve uma ligeira melhora, como visto nas figuras 4.34 e 4.35.

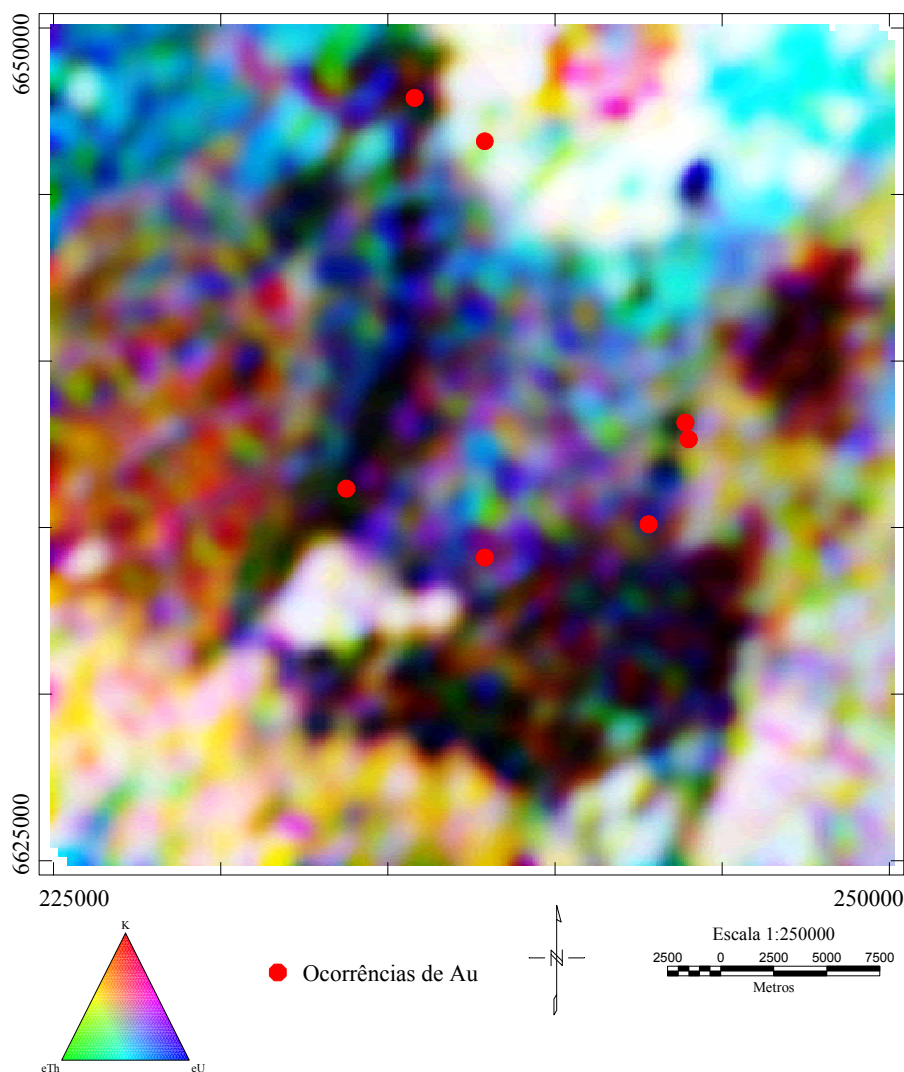


Figura 4.34. Imagem ternária dos canais de potássio, urânio e tório no padrão RGB (K-eTh-eU).

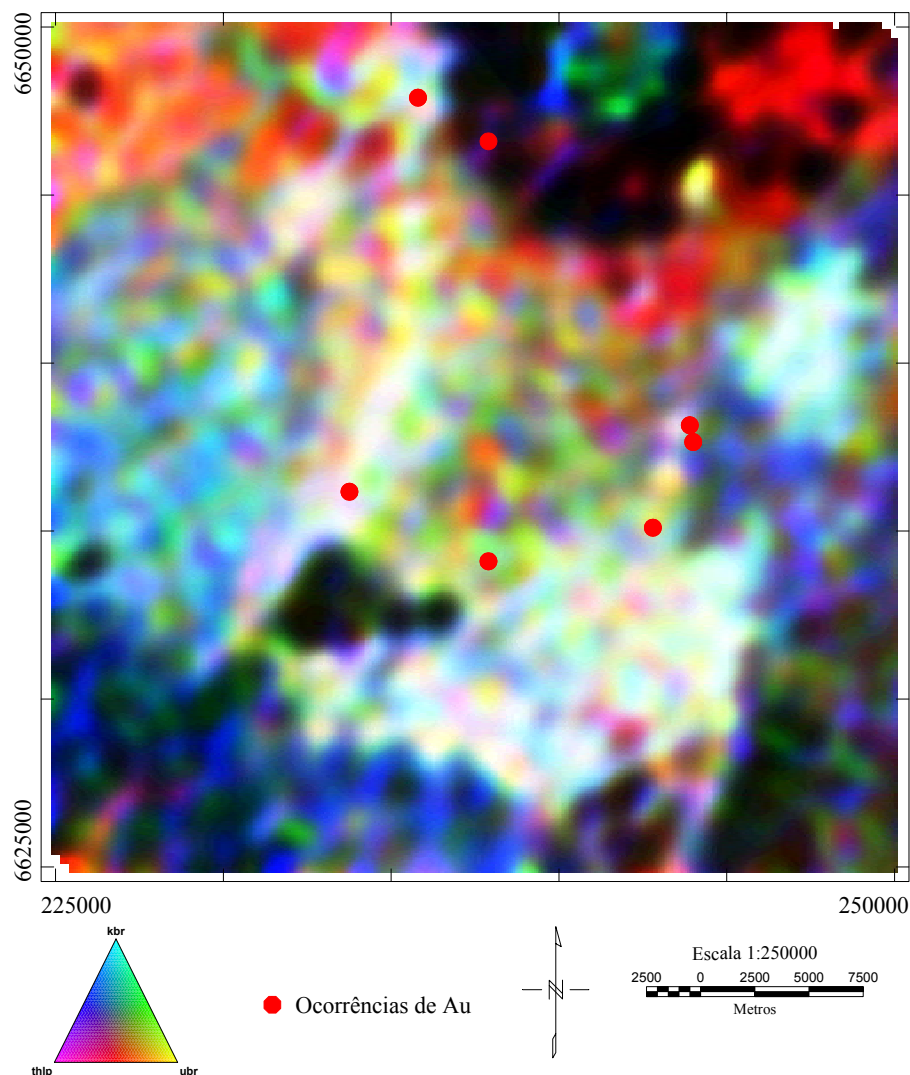


Figura 4.35. Imagem ternária dos canais de potássio, urânio e tório no padrão CMY (K-eTh-eU).

#### 4.11.9 Potássio Anômalo e Urânio Anômalo

No algoritmo desenvolvido por Pires (1995), a técnica para determinação do potássio anômalo baseia-se na teoria de que a relação potássio x tório e urânio x tório, também observada por Saunders *et al.* (1994) *apud* Pires (1995), é representada por uma função linear que passa pela origem. A inclinação da reta é determinada pela razão entre os valores das observações de potássio e tório, ao passo que o ponto de intersecção da reta no eixo y está representado pelo fator  $K_y$ . O procedimento é análogo para o comportamento do urânio. Para o potássio, temos a seguinte relação:

- $$K_i = (\overline{K_s} / \overline{eTh}) * eTh + K_y,$$

onde  $K_i$  é o potássio ideal, normalizado;  $\bar{K}$  é a concentração média de potássio;  $\overline{eTh}$  a concentração média de tório;  $eTh$  a concentração média do tório no ponto de amostragem e  $K_y$  o desvio da reta em relação à origem.

Os desvios dos valores reais a partir dos valores ideais, calculados para cada ponto, foram obtidos usando a equação:

- $$Kd = \frac{(\bar{K} - K_i)}{K_i}$$

Este método, segundo Carvalho (1999) é mais bem aplicado em unidades rochosas individualizadas, de modo que possa ser esperada uma homogeneidade do potássio em relação ao tório. Quanto maior for a dispersão dos dados, mais ineficaz será a separação entre as concentrações litológicas de potássio e aquelas realmente anômalas.

#### 4.11.10 Potássio anômalo e urânio anômalo para dados regionais

Na região que compreende o Complexo Bossoroca, pode-se verificar uma diversidade litológica em torno das Seqüências Arroio Lajeado e Campestre, por meio dos mapas de  $eTh$  e  $K$ , podemos verificar uma ampla variação no conteúdo dos elementos detectados em gamaespectrometria. Desta forma, tório e potássio possuem uma relação não linear, como mostrado na Figura 4.36.

A dispersão nos dados representa a variabilidade litológica na região do Complexo Bossoroca, sendo difícil à separação entre zonas onde o potássio está relacionado a fenômenos litológicos daqueles que poderiam refletir processos de enriquecimento hidrotermal, como também mostrados por Carvalho e Blum (1999) na região de *greenstone belts* de Pilar de Goiás e Guarinos.

A reta que melhor se ajustou aos dados regionais do Complexo Bossoroca apresentou uma inclinação de 3,1775511908 e  $K_y$  de -8,685729581.

- $K_i = 3,1775511908 * eTh - 8,685729581$

Substituindo  $K_i$  à equação do  $Kd$  se obtém o valor do potássio anômalo para cada ponto, resultando na Figura 4.37.

O mesmo se verifica para urânio, onde a reta que melhor se ajustou para os dados é:

- $U_i = 0,3833970627 * eTh + 9,900646977$

Da mesma forma pra os dados de urânio, substitui  $U_i$  à equação  $Ud$  para se obter os valores de urânio anômalo para a região do Complexo Bossoroca (Figura. 4.38).

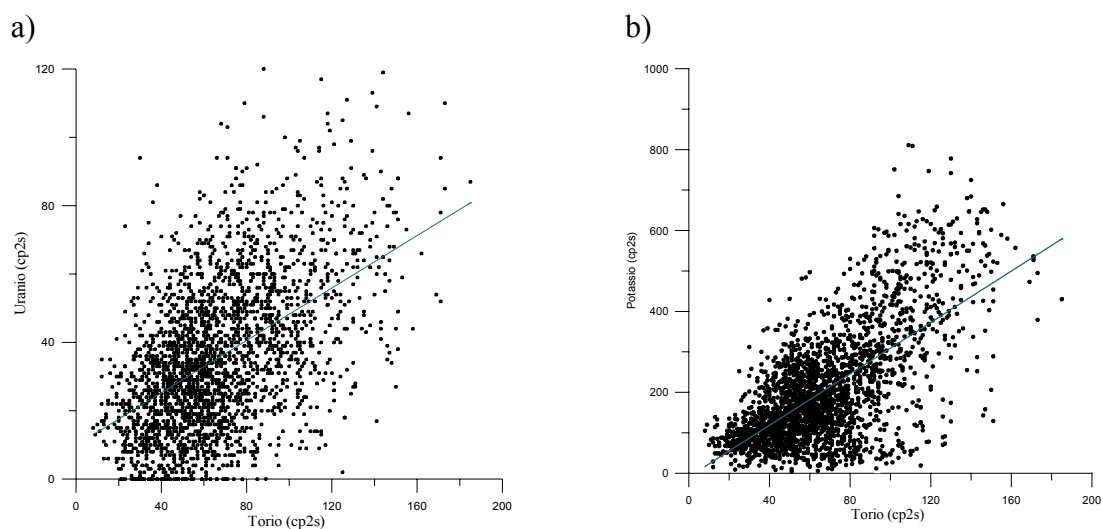


Figura 4.36. Relação Urânio x Tório e Potássio x Tório para os dados da região do Complexo Bossoroca.

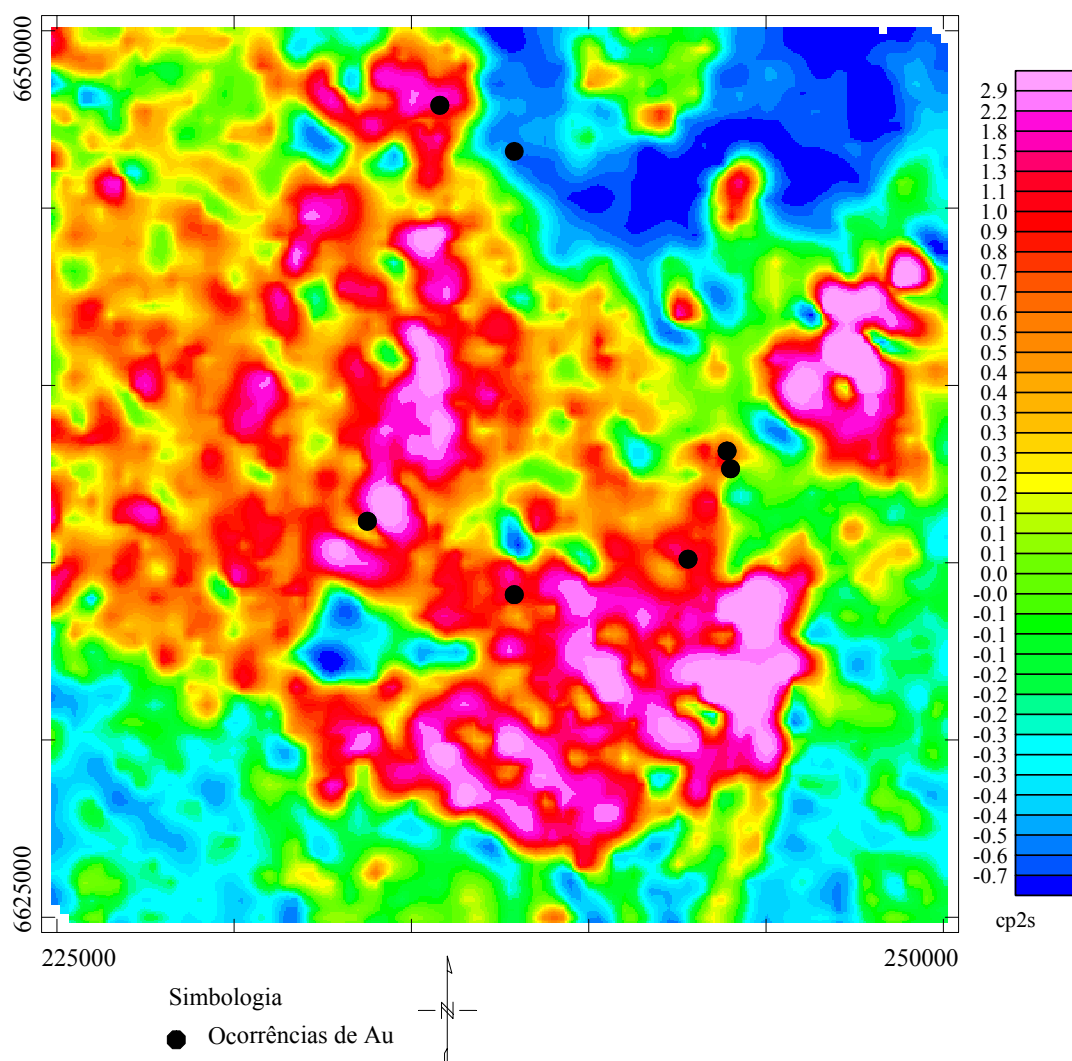


Figura 4.37. Imagem do potássio anômalo da região do Complexo Bossoroca.

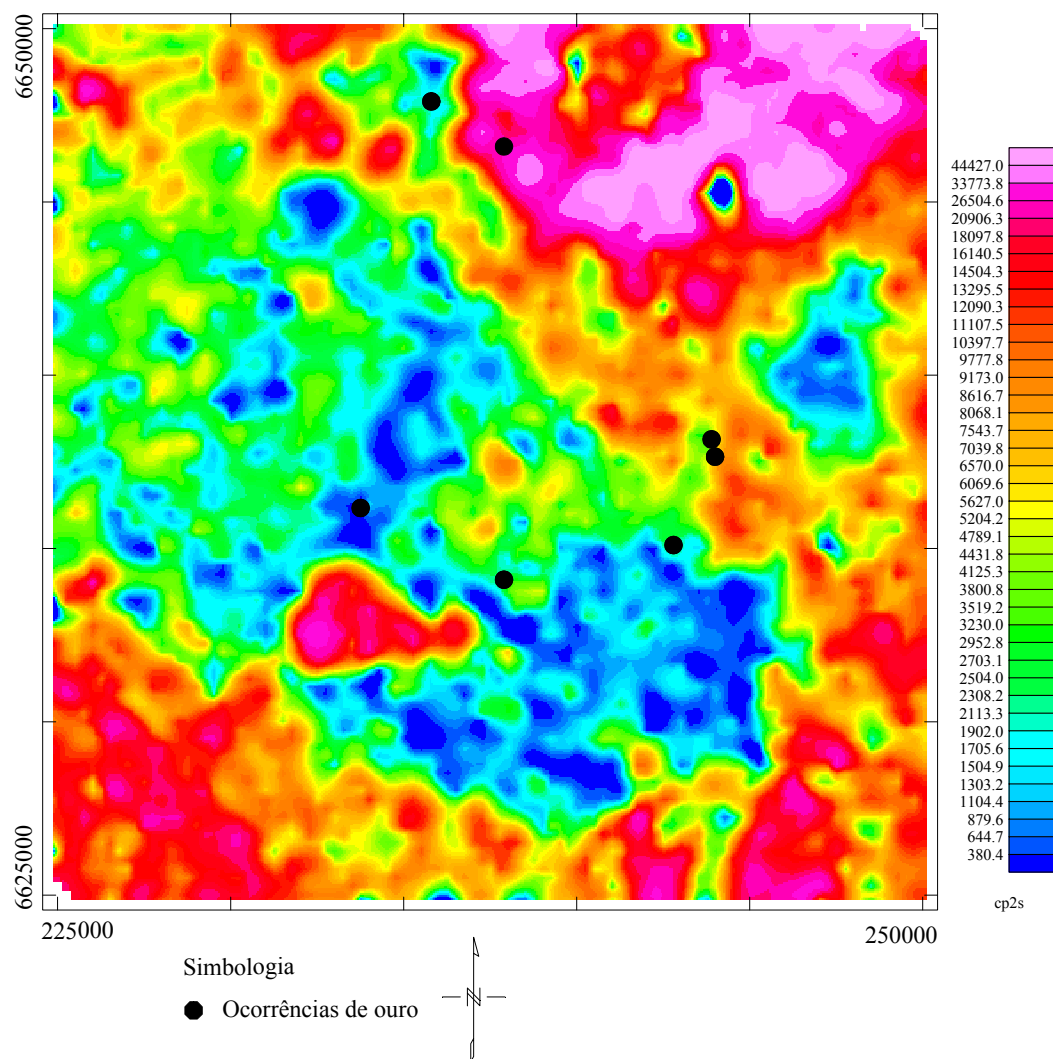


Figura 4.38. Imagem do urânio anômalo da região do Complexo Bossoroca.

#### 4.11.11 Parâmetro $F$

Ostrovskiy (1975) estudou o antagonismo radioativo em paredes de rochas alteradas através de processos metassomáticos, onde salienta que devido o alto poder de migração do potássio em relação ao tório e ao urânio, é possível a probabilidade de seu acúmulo em zonas hidrotermais, porque, ao contrário do tório e do urânio, o potássio está sempre na fase líquida da solução hidrotermal.

O Parâmetro  $F$ , utilizado por Prichystal ; Gnojeck (1985), em estudos na mineralização de zinco na República Tcheca, utilizaram-no na identificação de encaixantes hidrotermalmente alteradas por anomalias potássicas. Efimov também quantificou o parâmetro  $F$  mostrando que valores acima de 1.2 ou 1.3 são comuns em rochas não alteradas, ao passo que em rochas alteradas ele pode ser 2 ou ainda 5, excepcionalmente 10. Para se obter esses valores, são necessários a obtenção dos dados aerogeofísicos nas unidades em ppm. Sua estabilidade estatística é melhor do que a razão  $eTh/eU$ , segundo os autores. Um mapa com parâmetro  $F$  foi feito para região do Complexo Bossoroca (Figura 4.39), salientando regiões com prováveis locais com potássio hidrotermal.

A equação para o parâmetro  $F$  é expressa na relação:

$$F \equiv \frac{K.eU}{eTh} = \frac{K}{eTh/eU} = \frac{eU}{eTh/K}$$

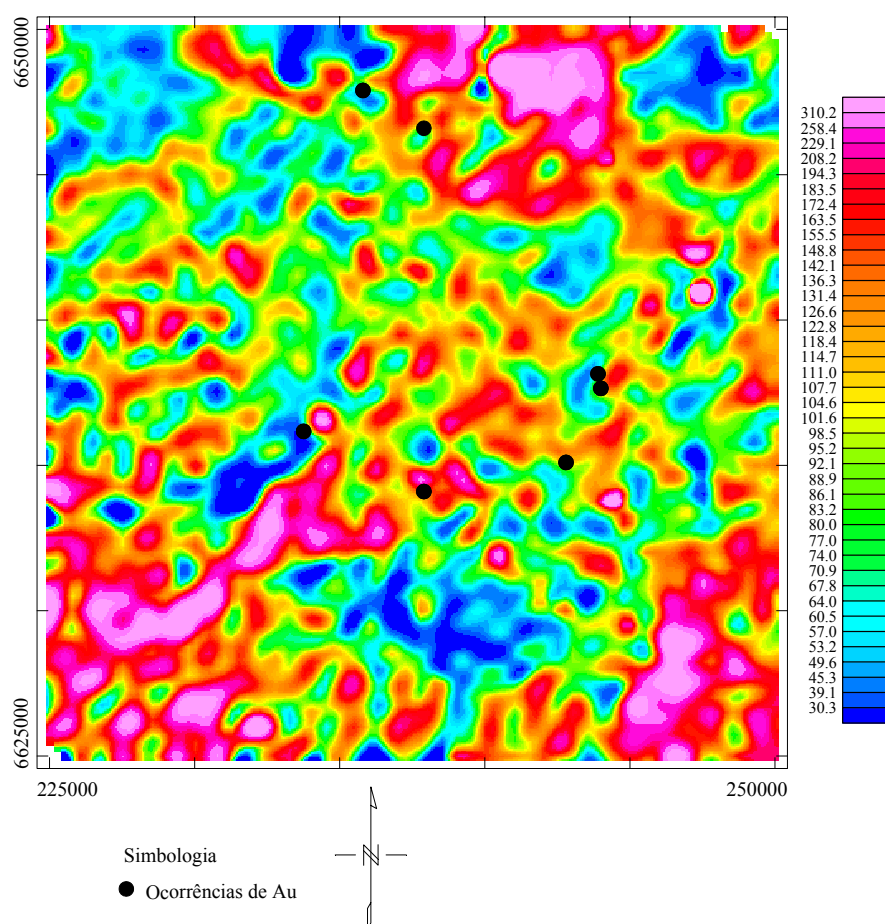


Figura 4.39. Mapa do parâmetro  $F$  para região do Complexo Bossoroca.



## **Capítulo 5**

# **Interpretação dos Dados Aeromagnéticos e Aeroaerogamaespectrométricos**

Nesse capítulo serão demonstradas as interpretações obtidas através do processamento de dados aeromagnéticos e aeroaerogamaespectrométricos, bem como sua correlação com a geologia e a geoquímica da região do Complexo Bossoroca com o objetivo de se buscar um conhecimento melhor das estruturas que a compõem e que estão associadas às ocorrências auríferas.

### **5.1 Interpretação dos Dados Aeroaerogamaespectrométricos**

#### **5.1.1 Análise Qualitativa**

A análise qualitativa aerogamaespectrométrica da região do Complexo Bossoroca foi baseada nas características estatísticas básicas dos dados (Tabela 5.1), delimitando-se zonas pela análise dos histogramas das imagens de K, eTh, contagem total e eU (Tabela 5.2). Após este procedimento, foram gerados mapas ternários na forma RGB e CMY, de tal modo que o primeiro gere nuances em altas contagens, enquanto o segundo diferencie melhor a unidade

de baixas contagens (Fuck, 2000). Como ferramenta de auxílio, se utilizou o realce por sombreamento na forma colorida nos canais individuais de K, eTh, eU e contagem total com pseudoiluminação com diversos ângulos de inclinação e declinação. Esses processos foram capazes de agrupar regiões que expressam respostas gamaespectrométricas semelhantes e separar domínios diferentes (Figura 5.1). A Tabela 5.3 indica as regiões com suas principais características radiométricas. Finalizando o processo de delimitação dos domínios, os domínios foram comparados com os mapas dos canais de contagem total, equivalente tório, equivalente urânio e potássio, para averiguar a coerência dos domínios.

### 5.1.2 Imagens Ternárias

As imagens ternárias são largamente utilizadas na caracterização geológica de uma região, pois a combinação do potássio, tório e urânio num único mapa permitem a discriminação de variações na composição interna de unidades geológicas. Geralmente se utiliza para caracterizar estas imagens o padrão RGB (Figura 4.34), onde o potássio está representado pela cor vermelha, o tório pelo verde e urânio pelo azul. Como neste modelo as cores são aditivas, as máximas concentrações dos três elementos resultam na cor branca e as mínimas em preto (Carvalho, 1999).

Outro padrão utilizado é o CMY (Figura 4.35) onde o potássio está representado na cor ciano, o tório em magenta e o urânio em amarelo. Por ser um método subtrativo, as maiores concentrações dos três elementos originam a cor preta e as menores aparecem em branco (Carvalho, 1999). O melhor resultado foi obtido nesse processo, que em conjunção com os resultados apresentados nas Tabelas 5.1 a 5.3 permitem identificar as grandes unidades gamaespectrométricas representadas na Figura 5.1.

Tabela 5.1. Zonas radiométricas (cp2s) na região do Complexo Bossoroca.

Níveis Radiométricos	Contagem Total	K	eTh	eU
Muito Baixo (mb)	0-1200	0-220	0-70	0-24
Baixo (b)	1200-2400	220-440	70-140	24-48
Médio (m)	2400-3600	440-660	140-210	48-72
Alto (a)	3600-4800	660-880	210-280	72-96
Muito Alto (ma)	4800-6000	880-1100	250-350	96-120

Tabela 5.2. Estatística básica para os dados radiométricos da região do Complexo Bossoroca.

Estatística básica	Contagem Total	K	eTh	eU
Mínimo	0	0	1.41	0
Máximo	5947.55	1012.77	313.52	111.40
Média	2016.821	316.02	84.21	36.44
Desvio padrão	898.8091	181.64	50.69	16.68
Mediana		259.02	70.85	33.18

Tabela 5.3. Características radiométricas para interpretação qualitativa dos dados aeroaerogamaespectrométricos.

Domínios	Litologias	Contagem Total	K	eTh	eU
Cobertura Sedimentar Bacia do Paraná	Formação Rio Bonito	m-a	mb	b-m	b
	Formação Hilário	b-a	b-a	b-m	m-a
Coberturas Sedimentares e Vulcanossedimentares Bacia do Camaquã	Formação Maricá	b-a	b-a	b-m	m-a
	Formação Acampamento Velho	b-a	b-a	b-m	mb-a
Granitos Pós- Tectônicos	Granito São Sepé	b-ma	b-ma	b-ma	b-a
	Granito Cerro da Cria	b-a	b-ma	b-ma	b-a
	Granito Ramada	b-a	b-ma	b-ma	b-a
Granito Tardi-Pós Tectônicos	Rincão dos Coqueiros	m-ma	b-ma		mb
	Complexo Cambaí	b-m	b	mb 0-40 b ~70	mb-b
Complexo Bossoroca	Seqüência Arroio Lajeado	mb-b	mb	mb 0-30	mb
	Seqüência Campestre	mb	mb 0-170 sul 180-220 norte	mb 0-30 sul 50-70 centro	mb 0-15 sul
	Complexo Estratiforme Máfico Ultramáfico	Complexo Pedras Pretas e Gabro Mata Grande	mb-b	mb	b 0-40
Formação Passo Feio		mb	mb	mb	mb

Na região de maior interesse, o Complexo Bossoroca, destaca-se os seguintes aspectos:

- Ao sul da Seqüência Campestre (domínio 1b), os teores dos três elementos encontram-se muito baixos a baixos, indicando a falta dos três elementos, característica de rochas máficas e ultramáficas, como visto na Formação Passo Feio

e a leste da Seqüência Arroio Lajeado, por exemplo. Essa diferença também pode ser visualizada nos mapas de contagem total (Figura 4.22), potássio (Figura 4.25), equivalente tório (Figura 4.28) e equivalente urânio (Figura 4.31);

- Ao norte da Seqüência Campestre (domínio 1a), os teores dos três elementos encontram-se baixos a altos, podendo estar representado as litologias de composição intermediária a ácida;
- A região das ocorrências da Mina Bossoroca e Passo da Juliana está situada numa região com teores muito baixos a médios entre os três elementos, no contato das Seqüências Arroio Lajeado e Campestre, no domínio 1c, podendo indicar uma região com concentrações maiores de rochas vulcânicas básicas a intermediárias;
- A região oeste da Seqüência Arroio Lajeado, no domínio 2, possui cores nos tons amarelos com maior predomínio, indicando a presença de teores mais elevados de eU e secundariamente em tons avermelhados, representando teores que variam entre o eU e eTh, indicando um provável predomínio das rochas químicas da seqüência.

A Tabela 5.4 resume os principais domínios geológicos identificadas nos mapas ternários, enquanto que a Figura 5.1 ilustra o mapa geológico aerogamaespectrométrico interpretado.

Tabela 5.4. Principais unidades litoestratigráficas da região do Complexo Bossoroca e seus principais domínios.

Unidades Litoestratigráficas	Domínios
Cobertura Sedimentar Bacia do Paraná	11 e 12
Coberturas Sedimentares e Vulcanossedimentares Bacia do Camaquã	10
Granito São Sepé	08
Granito Cerro da Cria	06
Granito Ramada	07
Rincão dos Coqueiros	09
Complexo Cambaí	03
Seqüência Arroio Lajeado	02
Seqüência Campestre	1a, 1b e 1c
Complexo Pedras Pretas	04
Gabro Mata Grande	05
Formação Passo Feio	11

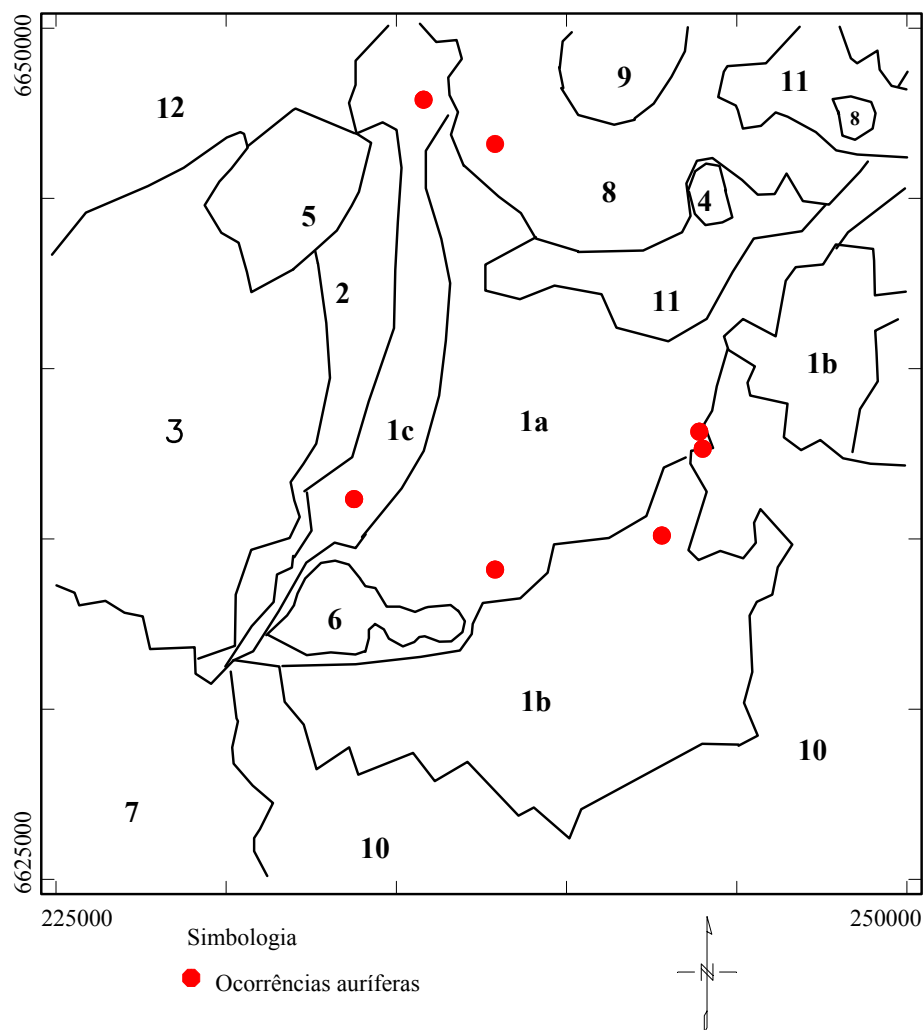


Figura 5.1. Mapa de interpretação geológica obtida a partir dos dados aerogeofísicos aerogamaespectrométricos. Os domínios são os mesmos apresentados na Tabela 5.4.

Comparando-se o mapa da Figura 5.1 obtido com auxílio dos dados aeroaerogamaespectrométricos, com o mapa geológico da Figura 2.2, pode-se notar que as principais unidades geológicas estão perfeitamente correlacionadas, com exceção no limite entre as Seqüências Arroio Lajeado e Campestre, em que a resolução dos mapas ternários não forneceu uma boa separação. Porém, foi possível, com maiores detalhes, separar a Seqüência Campestre em três unidades 1a, 1b e 1c, onde no mapa geológico, não há essa divisão. Traços retilíneos no mapa interpretativo representam falhas e zonas de cisalhamento da região.

## **5.2 Interpretação dos Mapas Contagem Total, K, eTh, eU**

### **5.2.1 Contagem Total**

Na imagem do canal de contagem total, os valores elevados indicam a presença de litologias mais ácidas enquanto que os valores mais baixos a presença de litologias mais básicas. A região sul da Sequência Campestre, a porção leste da seqüência Arroio Lajeado, a região leste da área de estudo representado pelas litologias da Formação Passo Feio e os sedimentos da bacia do Paraná marcam os baixos valores. A sudeste da Formação Passo Feio encontra-se no mapa geológico, uma região com rochas pertencentes ao Complexo Cambaí, no qual o mapa de contagem total, bem como os outros mapas aerogamaespectrométricos não detectaram diferenças a cerca dessas litologias.

Os lineamentos retirados do mapa de contagem total (Figura 5.2) estão preferencialmente em duas direções NE-SW e E-W associados, na sua maioria, a zonas de cisalhamentos regionais e limites geológicos.

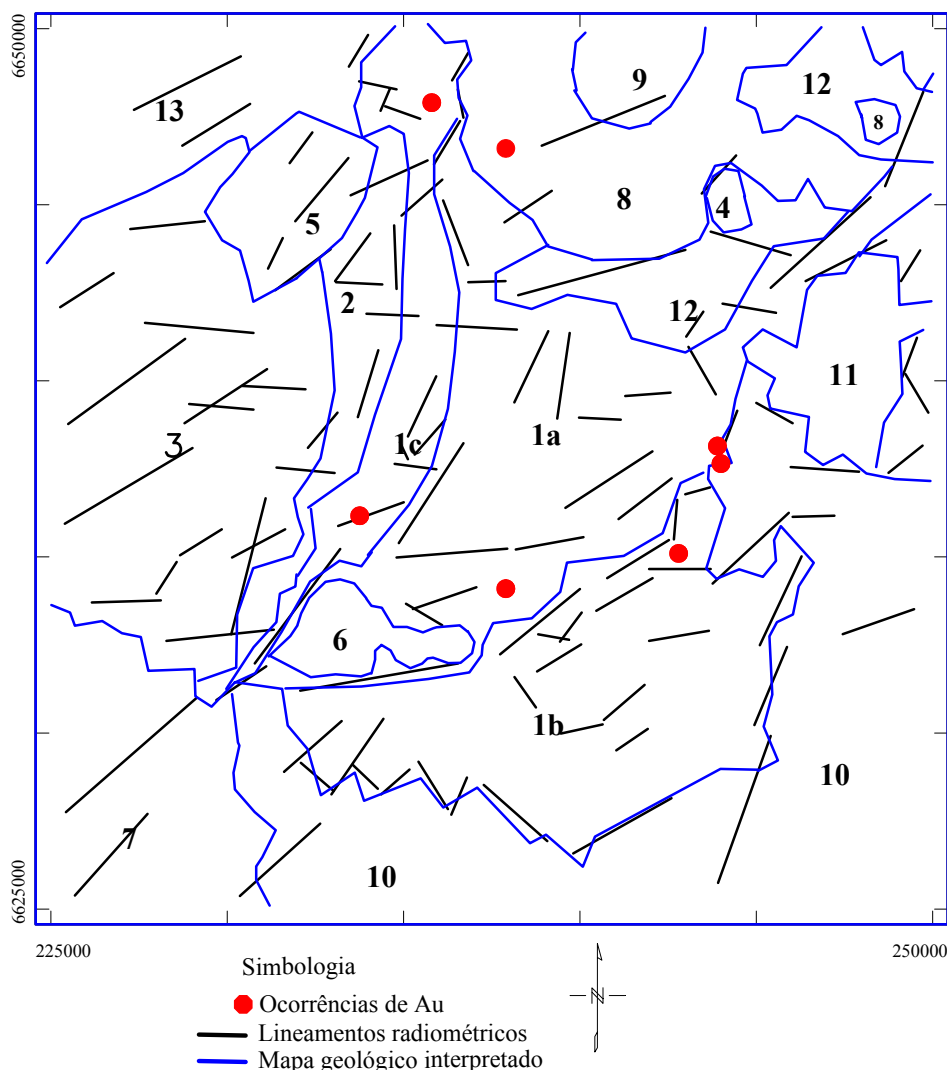


Figura 5.2. Mapa dos principais lineamentos do canal de contagem total da região do Complexo Bossorooca, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Seqüência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná.

### 5.2.2 Potássio

Os granitóides pertencentes ao desenvolvimento vulcânico da bacia do Camaquã (São Sepé, Cerro da Cria e Ramada) possuem valores elevados de K, bem como as litologias do Grupo TTG (tonalitos, trondjemitos e granodioritos) do Complexo Cambaí, identificando a litologias mais ácidas com pseudocoloração em tons avermelhados, assim como as rochas básicas e ultrabásicas da Seqüência Campestre, Seqüência Arroio Lajeado, o Gabro Mata

Grande (a NW da Seqüência Arroio Lajeado), o Complexo Pedras Pretas (a sudeste do Granito São Sepê), e a Formação Passo Feio (a NE das vulcânicas da Bacia do Camaquã), que completam as litologias básicas e ultrabásicas da região, apresentam baixos teores de K com tonalidades azuis no mapa pseudocolorido. Também possuem pseudocoloração em cores frias, os sedimentos pertencentes à bacia do Camaquã à NW da região.

Os lineamentos retirados deste mapa expressam, na maioria dos casos os limites geológicos, bem como falhas e fraturas ou zonas de cisalhamento por onde o potássio pode ter sido remobilizado, como visto na Figura 5.3 associados com os limites litológicos retirados do mapa ternário no padrão CMY. Os principais lineamentos encontram-se nas direções NW-SE e NE-SW e mais raramente nas direções E-W e N-S.

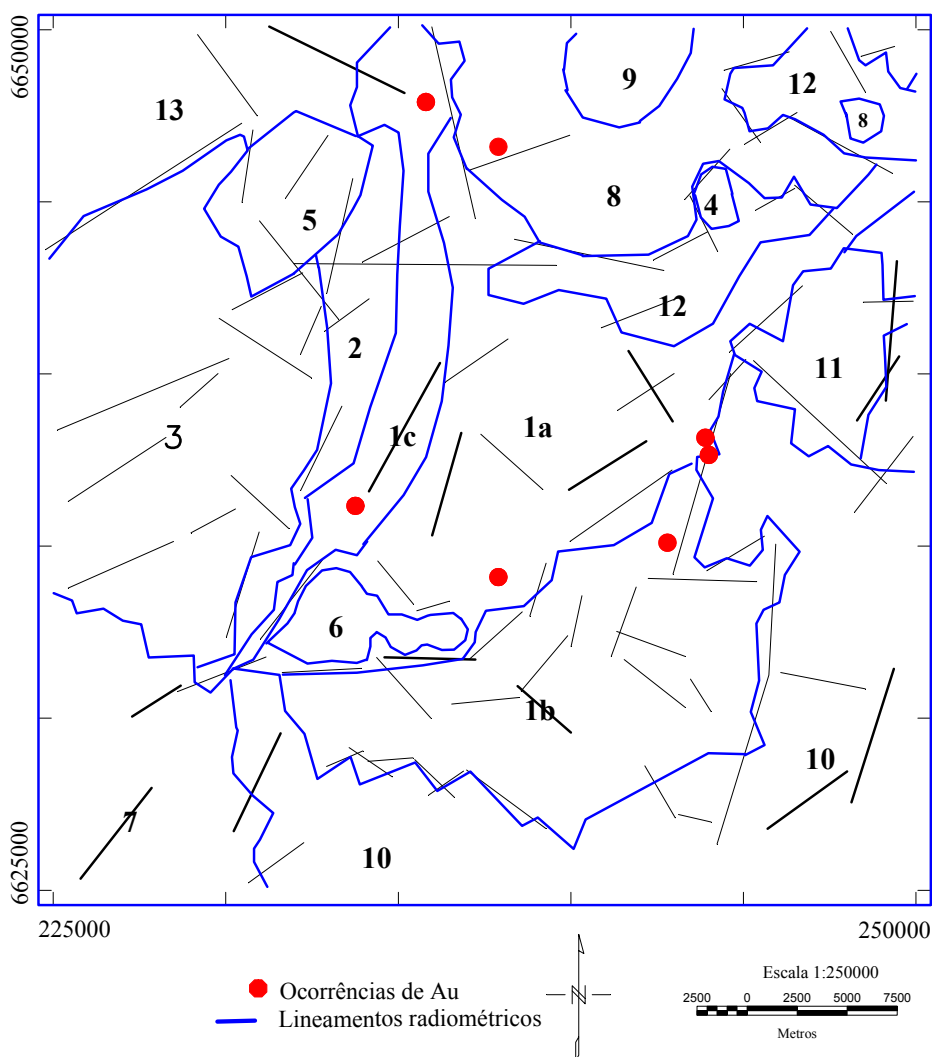


Figura 5.3. Mapa de lineamentos obtidos através do canal de potássio da região do Complexo Bossoroca, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Seqüência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepê; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná.



### 5.2.3 Equivalente Tório

O elemento químico tório, por suas características químicas, dos elementos radiométricos, é o menos móvel no ambiente natural e considerado o melhor mapeador geológico dentre os elementos utilizados dentro da gamaespectrometria, de acordo com Carvalho (1999). Devido as suas características físicas e químicas, a grande maioria das rochas submetida a processos intempéricos e hidrotermais, não apresenta grandes alterações no conteúdo de tório em relação às rochas originais.

As Figuras 4.28, 4.29 e 4.30 representam a variação do eTh na região do Complexo Bossoroça. Apesar das medidas serem de baixos valores, essas Figuras mostram os limites geológicos muito próximos da realidade. As rochas básicas e ultrabásicas com baixos valores, bem como as rochas ácidas e intermediárias com valores médios a elevados. Pode-se destacar os baixos valores na Seqüência Campestre, na parte sul, a Formação passo Feio, o Gabro Mata grande e o Complexo Pedras Pretas. Provavelmente, os baixos valores representados na direção N-S, onde estão localizados as ocorrências Bossoroça e Passo da Juliana, e os valores baixos no Complexo Cambaí, podem estar representando o rio Bossoroça e seus afluentes. Ao contrário do mapa representando os valores de potássio, o tório encontra-se com valores elevados nos sedimentos da bacia do Paraná e nos sedimentos vulcânicos da Bacia do Camaquã.

Os lineamentos retirados do mapa de equivalente tório (Figura 5.4) têm como orientações preferenciais às direções NE-SW, NW-SE e E-W discriminando, possivelmente, contatos geológicos e falhas que podem indicar condutos para os fluidos mineralizantes, como é o caso das minas Bossoroça e Passo da Juliana.

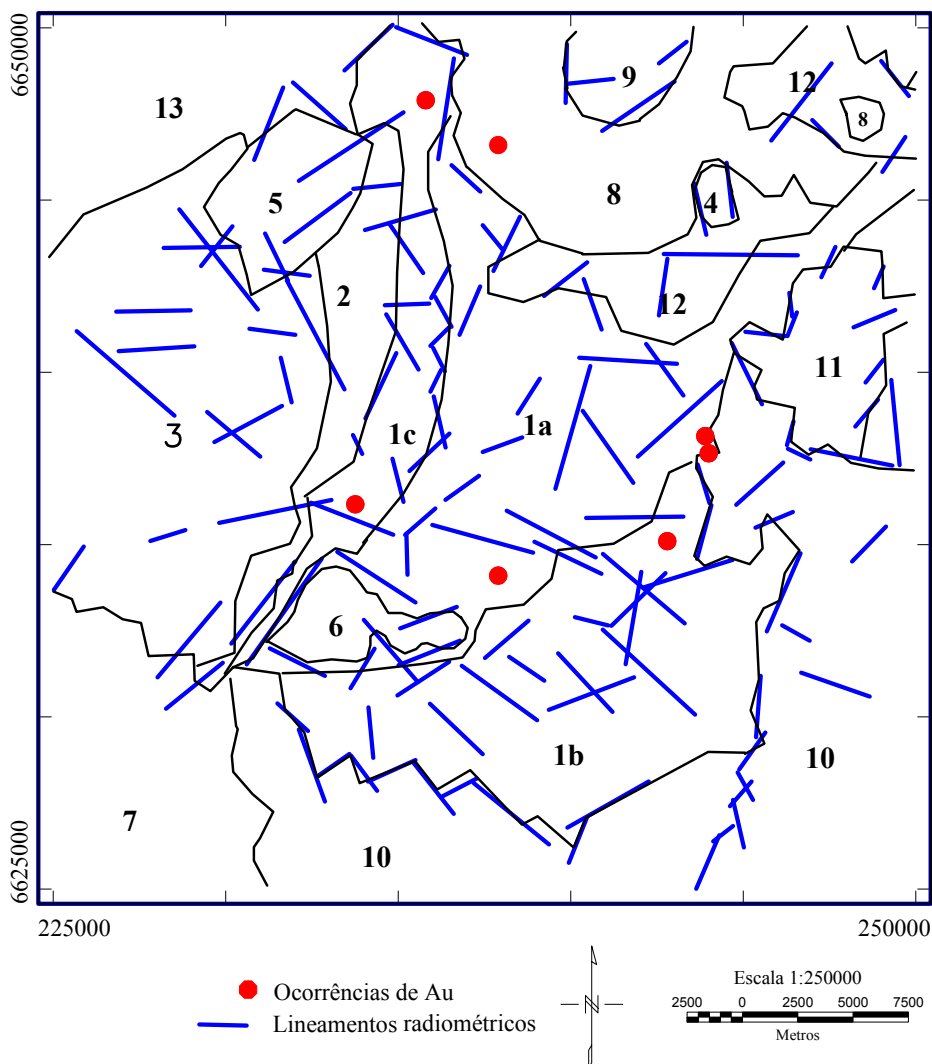


Figura 5.4. Mapa dos principais lineamentos do canal de equivalente tório da região do Complexo Bossoroça, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Sequência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná.

#### 5.2.4 Equivalente Urânio

Apesar de ser um elemento químico com o peso atômico elevado, o urânio pode ser remobilizado sob condições oxidantes, podendo se concentrar ao longo das drenagens e sofrer um maior espalhamento do que os demais elementos (Carvalho 1999). Porém, devido aos baixos valores disponíveis nas medidas deste canal, não foi possível fazer esta correlação.

As litologias de maior concentração de urânio estão relacionados as litologias ácidas como os granitóides da região, bem como parte das rochas vulcânicas da Seqüência Campestre e das vulcânicas pertencentes à bacia do Camaquã e dos sedimentos de cobertura da bacia do Paraná. As ocorrências auríferas da região do Complexo Bossoroca encontram-se em zonas de baixas concentrações de urânio, com exceção da ocorrência encontrada no Granito São Sepé (Figura 5.5).

Os teores elevados de urânio no Complexo Bossoroca, nas Seqüências Arroio Lajeado e Campestre podem estar associadas às rochas sedimentares químicas do tipo formações ferríferas, filitos. O falhamento Cerrito do Ouro é marcado pela variação dos valores do canal de urânio. E da mesma forma que os demais canais, os lineamentos marcam os principais limites litológicos, falhas e fraturas.

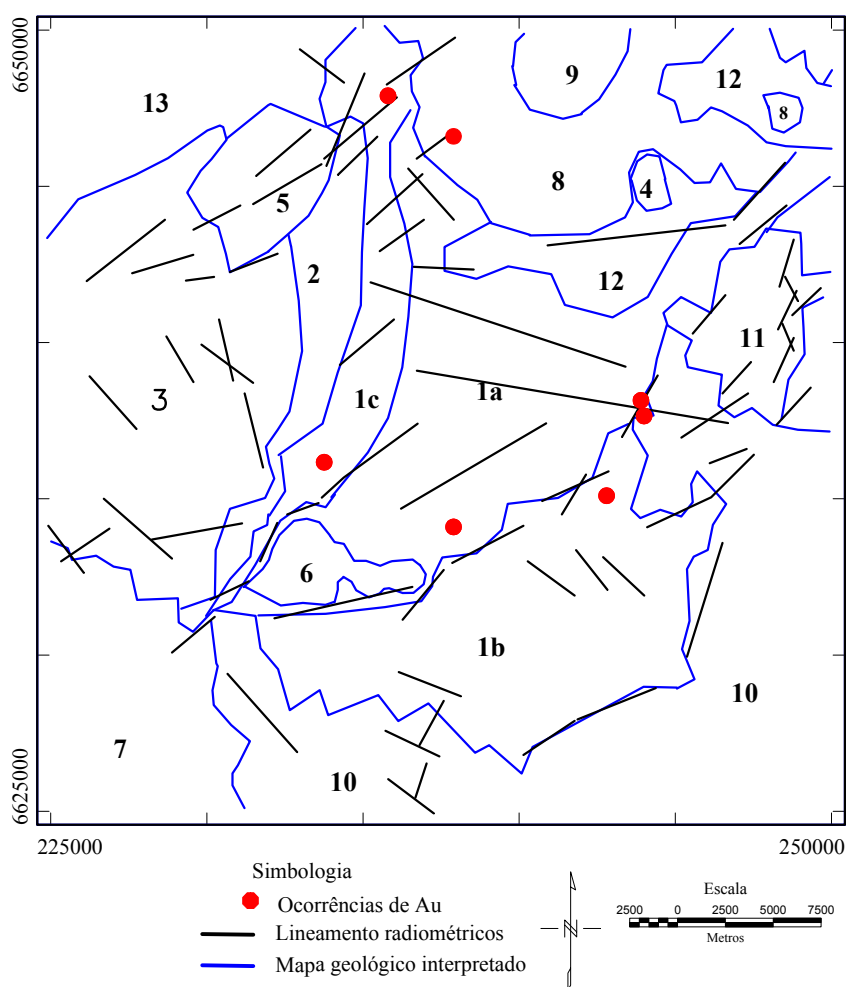


Figura 5.5. Mapa de lineamentos do canal de equivalente urânio da região do Complexo Bossoroca, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Seqüência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná.

### 5.3 Interpretação das imagens de razões eU/K, eU/eTh e eTh/K

#### 5.3.1 eTh/K

Por ser um elemento pouco móvel, o tório tende a maiores correlações com sua rocha fonte, não será removido através de processos hidrotermais ou supergênicos e desta forma poder determinar a sua concentração litológica normal, ou seja, aquelas devidas exclusivamente à gênese das rochas, Carvalho (1999). O potássio, ao contrário, tende a se correlacionar em menor proporção com sua rocha fonte por ser um elemento com capacidade de se remobilizar durante eventos metamórficos e hidrotermais, podendo constituir zonas de hidrotermalismo potássico.

Anomalias baixas nas razões eTh/K podem representar zonas de alteração hidrotermal, constituindo alvos para exploração mineral, ou variações litológicas (Figura 5.6). A razão entre as concentrações de tório e potássio tende a mostrar zonas em que ocorreu depleção ou concentração de potássio sem ter havido enriquecimento de tório (Carvalho 1999). A Figura 5.6 mostra a imagem da razão eTh/K associado ao mapa geológico interpretativo aerogamaespectrométrico da região do Complexo Bossoroca, no qual podemos inferir algumas considerações:

- Baixos na razão eTh/K na região 2 que compreende o limite entre a Seqüência Campestre e a Seqüência Arroio Lajeado, onde as ocorrências auríferas da Mina Bossoroca e Passo da Juliana encontram-se próximas dessa região. Baixos na razão também podem ser identificados nas regiões que do Complexo Cambaí, Formação Passo Feio e nos Granitos Ramada, Rincão dos Coqueiros e no Complexo Pedras Pretas;
- Razões elevadas nas litologias que compreende a Seqüência Arroio Lajeado, nas coberturas sedimentares da Bacia do Paraná, no Gabro Mata Grande e na região 2a da Seqüência Campestre;
- Variações composicionais encontram-se principalmente nas regiões 1b da Seqüência Campestre e no limite entre as vulcânicas da Seqüência Campestre e as vulcânicas da Bacia do Camaquã. Essas variações estão preferencialmente na direção NW-SE, podendo indicar possíveis locais de falhamentos.

A Figura 5.7 representa zonas onde ocorrem variações composicionais dentro da Seqüência Campestre e os principais lineamentos extraídos dessas variações.

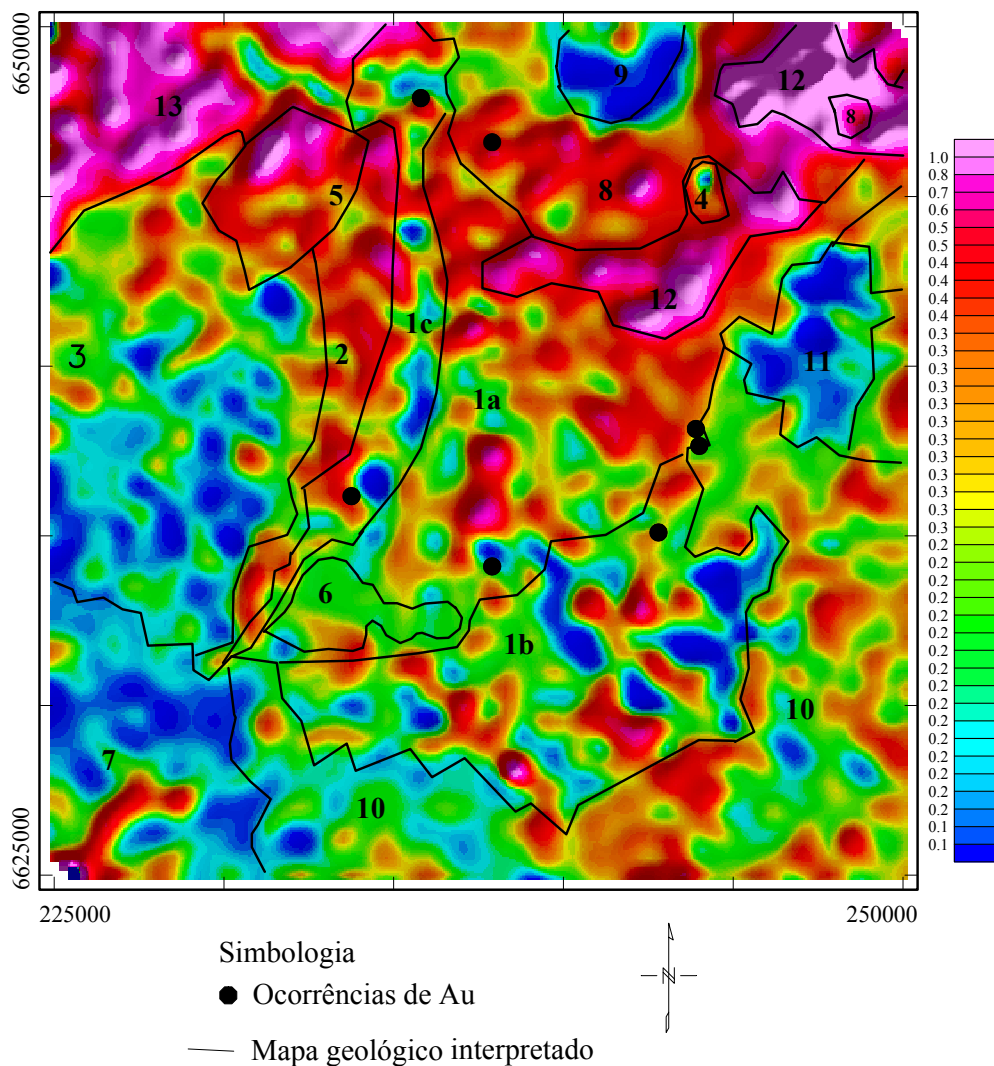


Figura 5.6. Mapa da razão  $eTh/K$  associado ao mapa geológico interpretativo extraído dos dados aeroaerogamaespectrométricos da região do Complexo Bossoroca, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Seqüência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná.

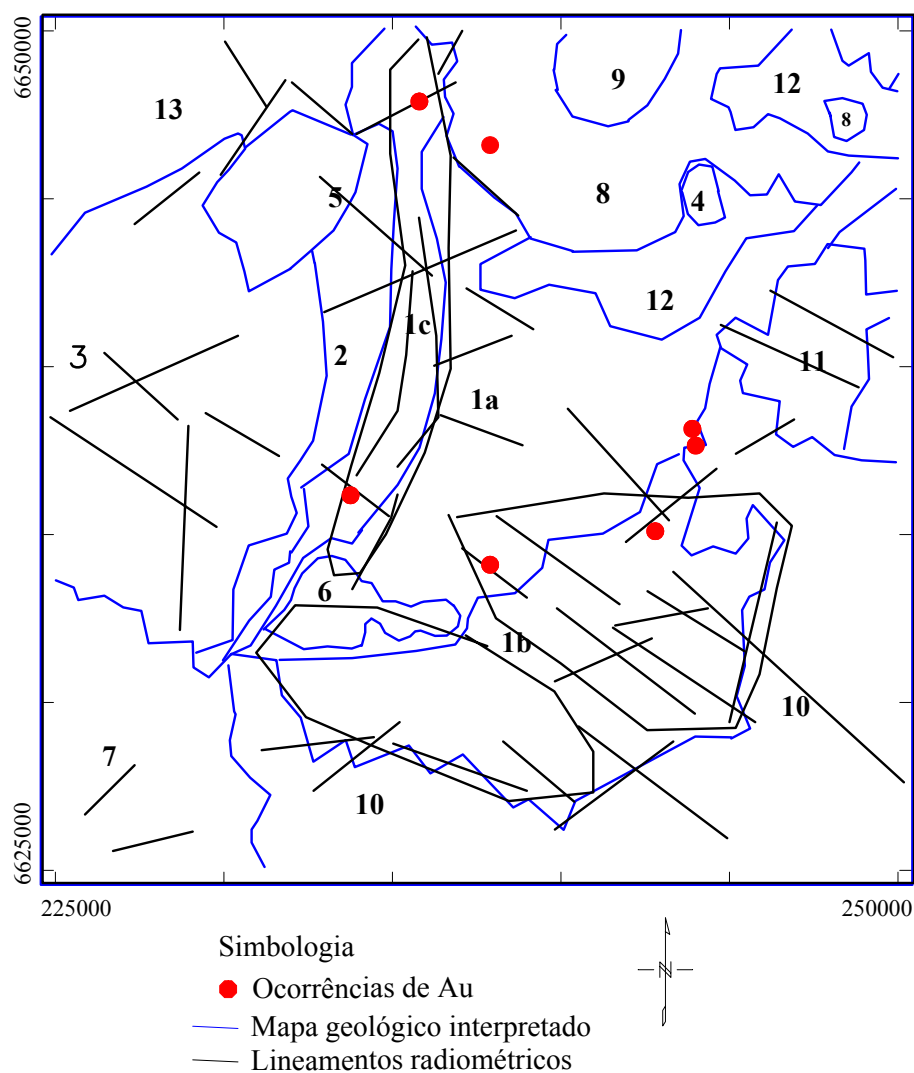


Figura 5.7. Mapa interpretativo da imagem da razão eTh/K associado ao mapa geológico interpretativo extraído dos dados aeroaerogamaespectrométricos da região do Complexo Bossoroca, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1 b e 1 c corresponde a Formação Campestre; 2 Sequência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanosedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná.

### 5.3.2 Razão eU/Th

A razão eU/eTh (Figura 5.8) é geralmente utilizada para determinar a lixiviação de urânio no sistema. O desequilíbrio nessa razão pode indicar a intensidade de intemperismo e o transporte de material do regolito. Apesar da pouca definição litológica, ela determina as concentrações relativas de um ou de outro elemento, podendo estar associadas as mineralizações uraníferas.

Os domínios 1a, 1b e 1c que representam as litologias da Seqüência Campestre, possuem as regiões com os maiores valores na região assim como a região N-NW do domínio 11 que representa as litologias da formação Passo Feio; o domínio 4 d da região do Complexo Pedras Pretas; o núcleo do domínio 4 da região do Granito Rincão dos Coqueiros e a região do domínio 13 representando as litologias da Bacia do Paraná o norte do domínio 3 das litologias do Complexo Cambaí e a região central do domínio 10, das vulcânicas da Bacia do Camaquã.

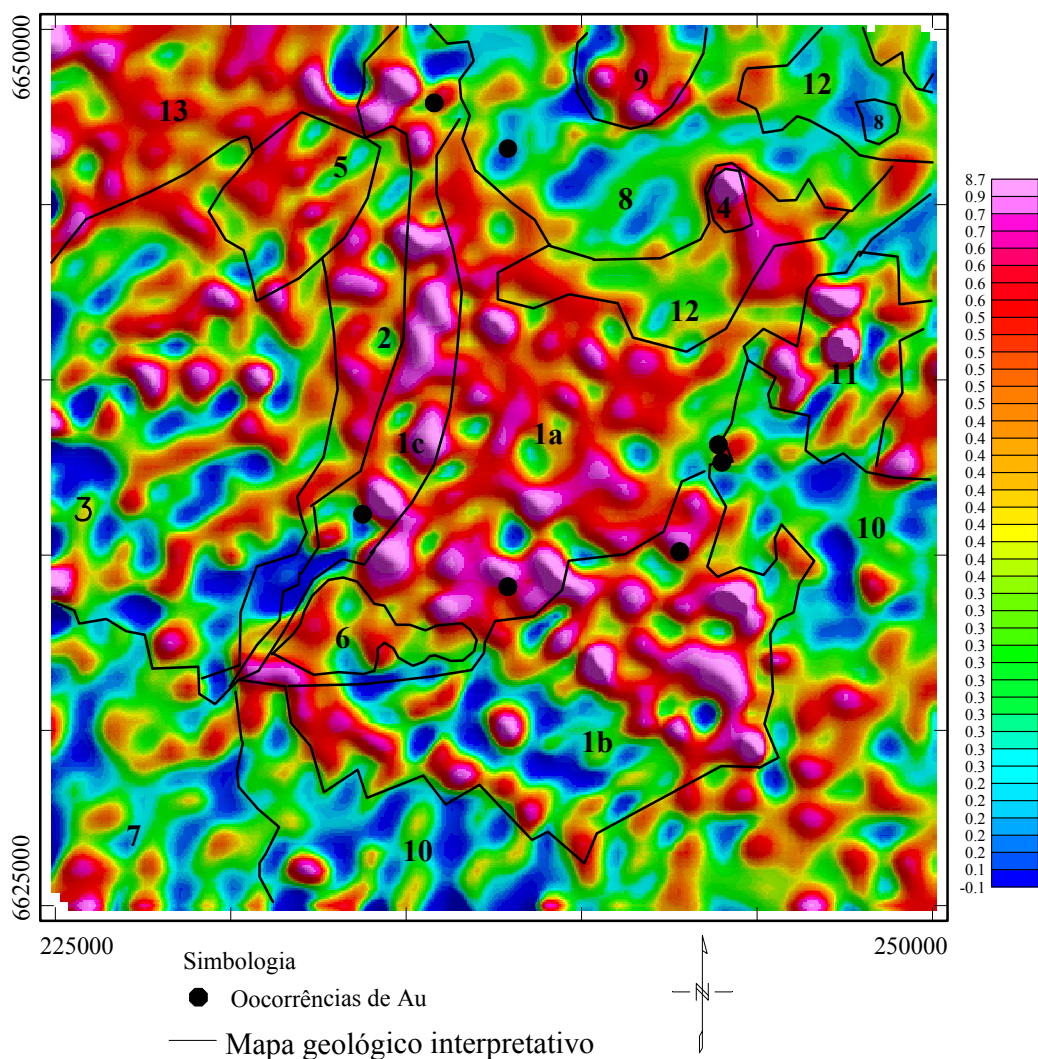


Figura 5.8. Mapa da razão eU/eTh associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Seqüência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná.

### 5.3.3 Razão eU/K

Urânio e potássio podem ocorrer associados e sofrem fortes influências do intemperismo, magmatismo e hidrotermalismo. Porém, a variação litológica é bastante evidente, marcando variações composicionais internas das unidades (Figura 5.9). Essas variações podem ser notadas principalmente nas unidades 3, 1, 10 e 9 que correspondem ao Complexo Cambaí, Seqüência Campestre, vulcânicas da Bacia do Camaquã e o granito Rincão dos Coqueiros, respectivamente.

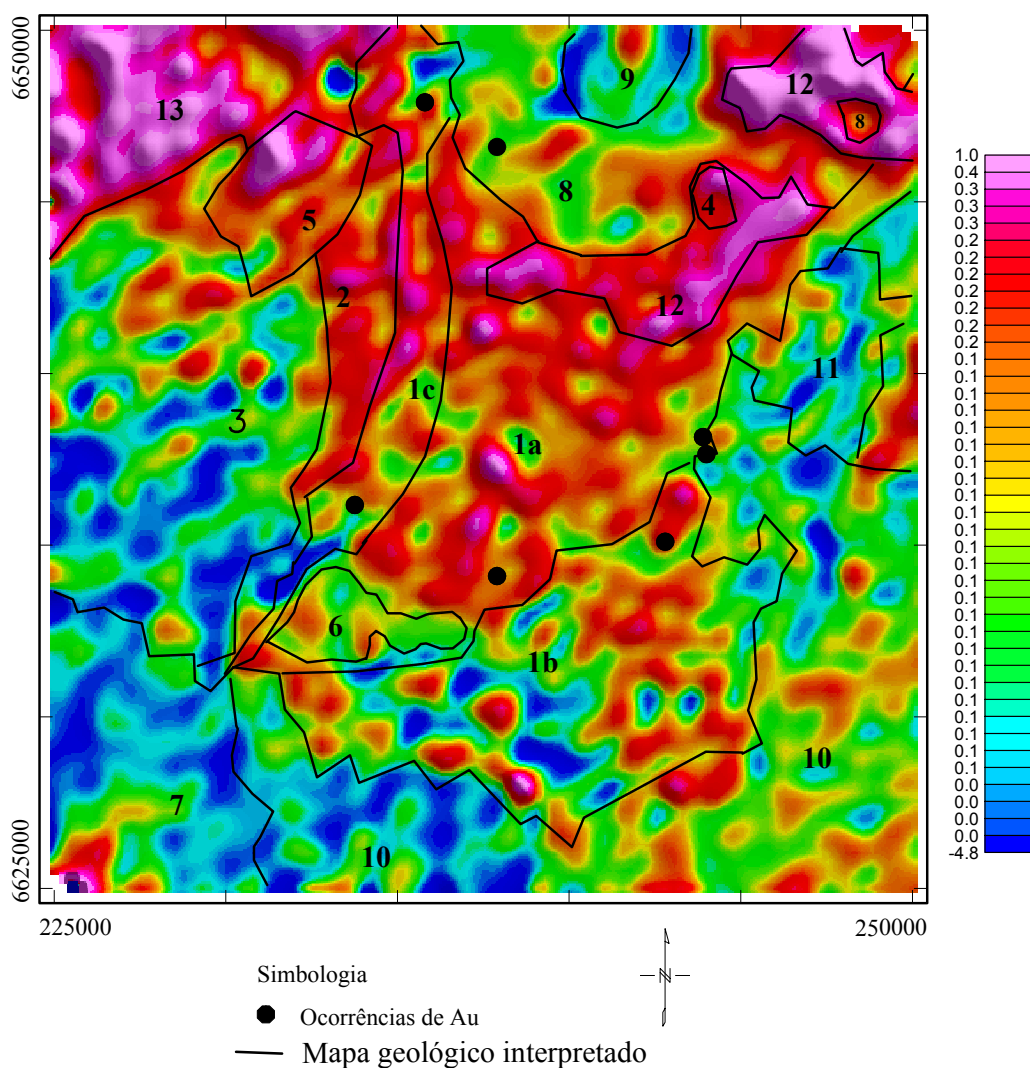


Figura 5.9. Mapa da razão eU/K associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Seqüência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná.



## **5.4 Interpretação dos dados aerogamaespectrométricos**

Nesse item, para fins interpretativos, são consideradas as associações anômalas com as unidades litológicas do Complexo Bossoroca, a variação de potássio em relação à alteração hidrotermal e ao intemperismo e as principais quebras de relevo aerogamaespectrométricos.

### **5.4.1 Interpretação das imagens de potássio e urânio anômalos**

O algoritmo da técnica de potássio anômalo foi criado para suprimir contribuições primárias (devidas às rochas superficiais, fator que influencia a variação do rádio-elementos nas rochas), sem que haja a necessidade da separação de unidade geológica ou da digitalização do mapa geológico para que se estude cada resposta sobre seu teor litológico (Blum, 1999).

O potássio anômalo foi estimado para toda área de estudo e foi colocado junto com o mapa de domínios a fim de ressaltar e correlacionar as anomalias com as unidades geológicas (Figura 5.10). Pode-se notar que todos os domínios que representam as rochas graníticas (8, 6 e 7) apresentam valores baixos e que as ocorrências auríferas, exceto a ocorrência encontrada na região do Granito São Sepé, encontram-se nos valores elevados de potássio anômalo. Algumas regiões dos domínios 10 e 13, correspondentes a Bacia do Camaquã e Paraná respectivamente também possuem valores baixos, bem como a região central do domínio 1a, pertencentes à Seqüência Campestre.

O algoritmo também foi aplicado ao urânio para região do Complexo Bossoroca, onde as tonalidades azuis estariam representando as rochas com concentrações primárias de urânio e as tonalidades avermelhadas as concentrações anômalas (Figura 5.11).

Os valores baixos estão associados às rochas mais básicas como nos domínios 1b, 1c, 11, 4, 5, 3 (em alguns locais) e 2. As ocorrências auríferas parecem estar associadas, na maioria dos casos, a zonas de baixos valores de urânio anômalo, ou seja, em rochas de contribuições primárias, exceto na região de ocorrência no Granito São Sepé e nas ocorrências 4 e 5.

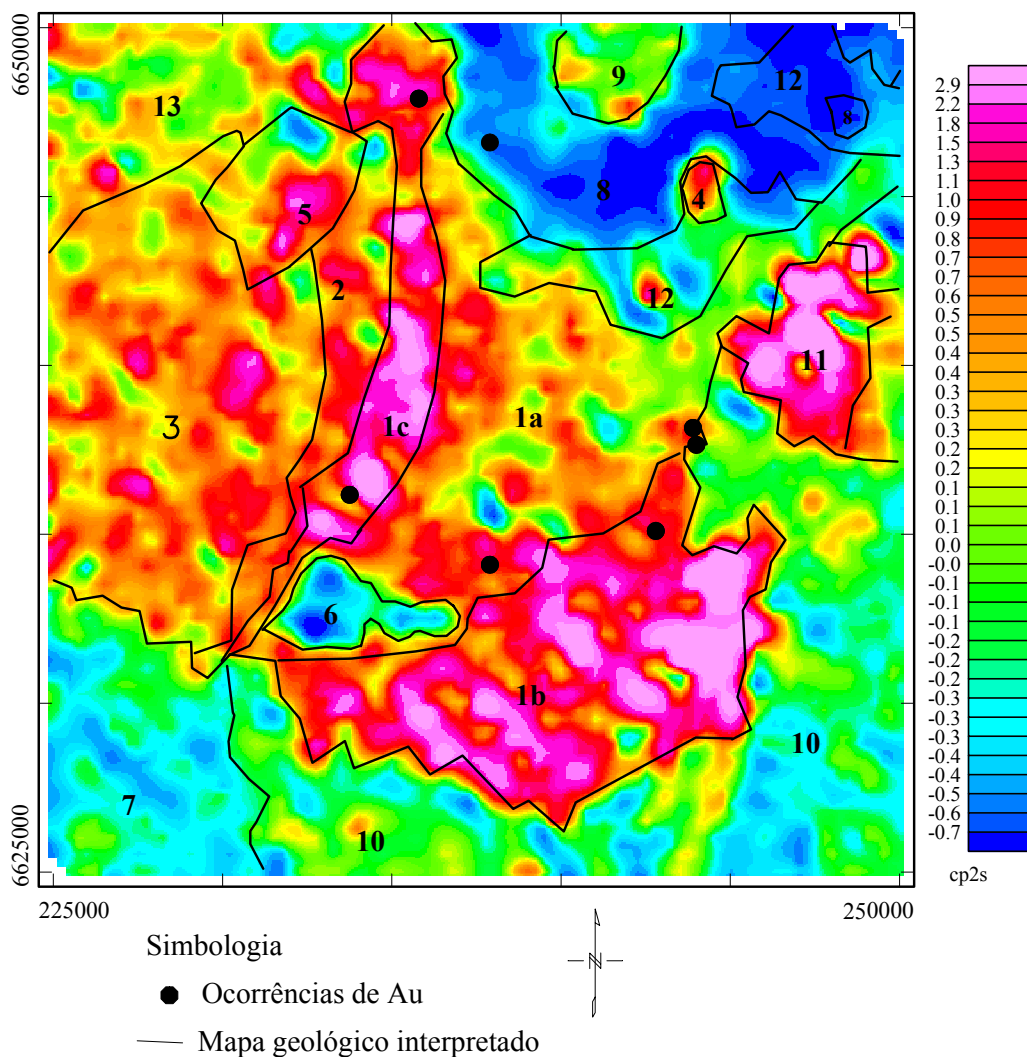


Figura 5.10. Mapa de potássio anômalo da região do Complexo Bossoroca, indicando os locais para se encontrar potássio hidrotermal, mostrado pelos valores mais altos associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Sequência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná.

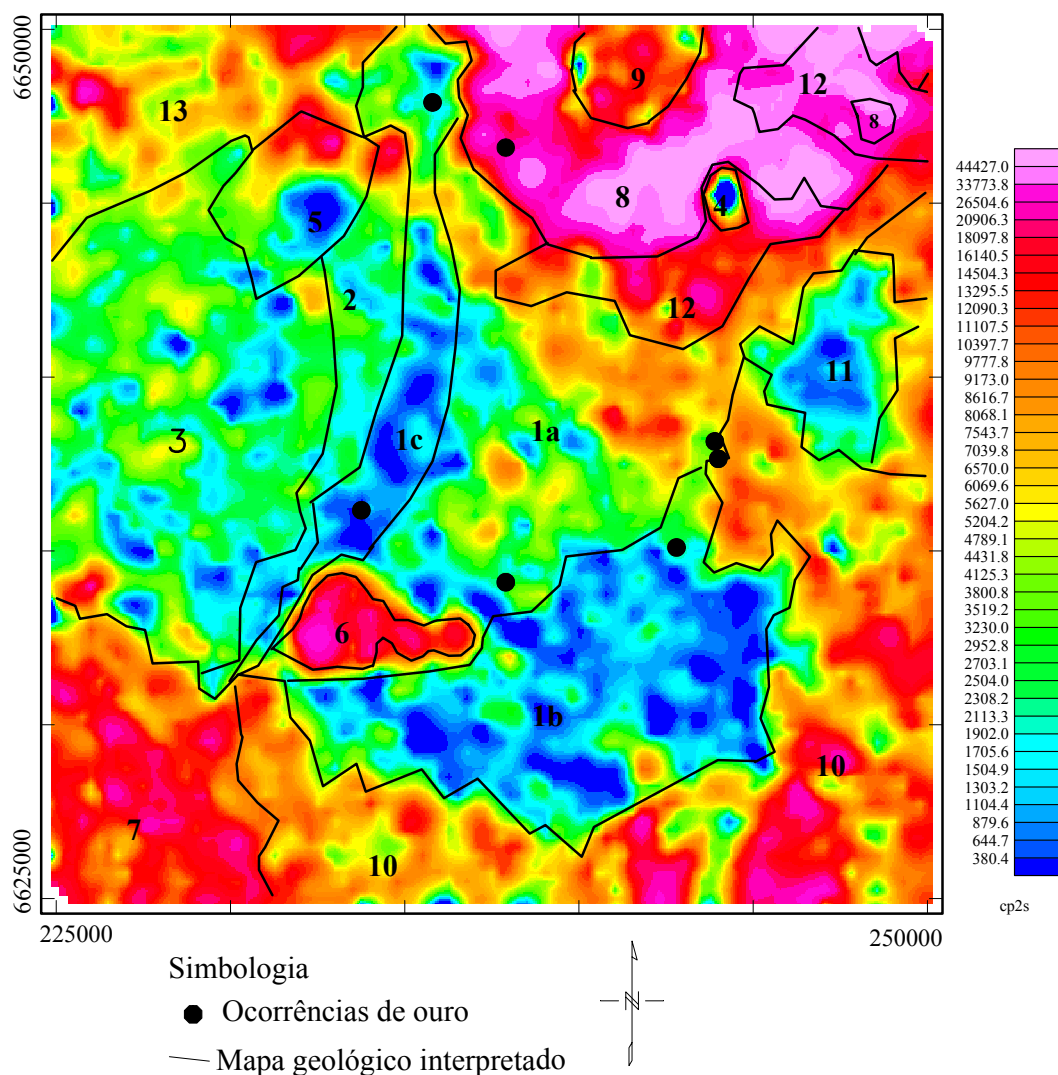


Figura 5.11. Mapa de urânio anômalo da região do Complexo Bossoroca, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Sequência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná.

#### 5.4.2 Parâmetro $F$

O parâmetro  $F$  é utilizado para detectar regiões anômalas de potássio pelo antagonismo entre o tório e o potássio, o qual é típico de processos de alteração acompanhado por enriquecimento secundário de potássio. Os valores baixos representam as anomalias de tório, enquanto que altos valores, anomalias de potássio (Figura 5.12). Estudos geoquímicos feitos por Koppe (1990), indicam que as razões  $K_2O/Na_2O$  têm valores menores do que um, para os metatufos grosseiros, grafitosos, lapilíticos e finos da Sequência Campestre, onde a ocorrência

aurífera estaria associada a baixos valores de potássio. Podemos averiguar a presença desta ocorrência tendendo a proximidade de valores baixos e também de valores altos, no domínio 1c, assim como a ocorrência Passo da Juliana, ao norte desse domínio. Regiões com valores baixos próximos de valores altos podem servir de guia prospectivo para o domínio 1c.

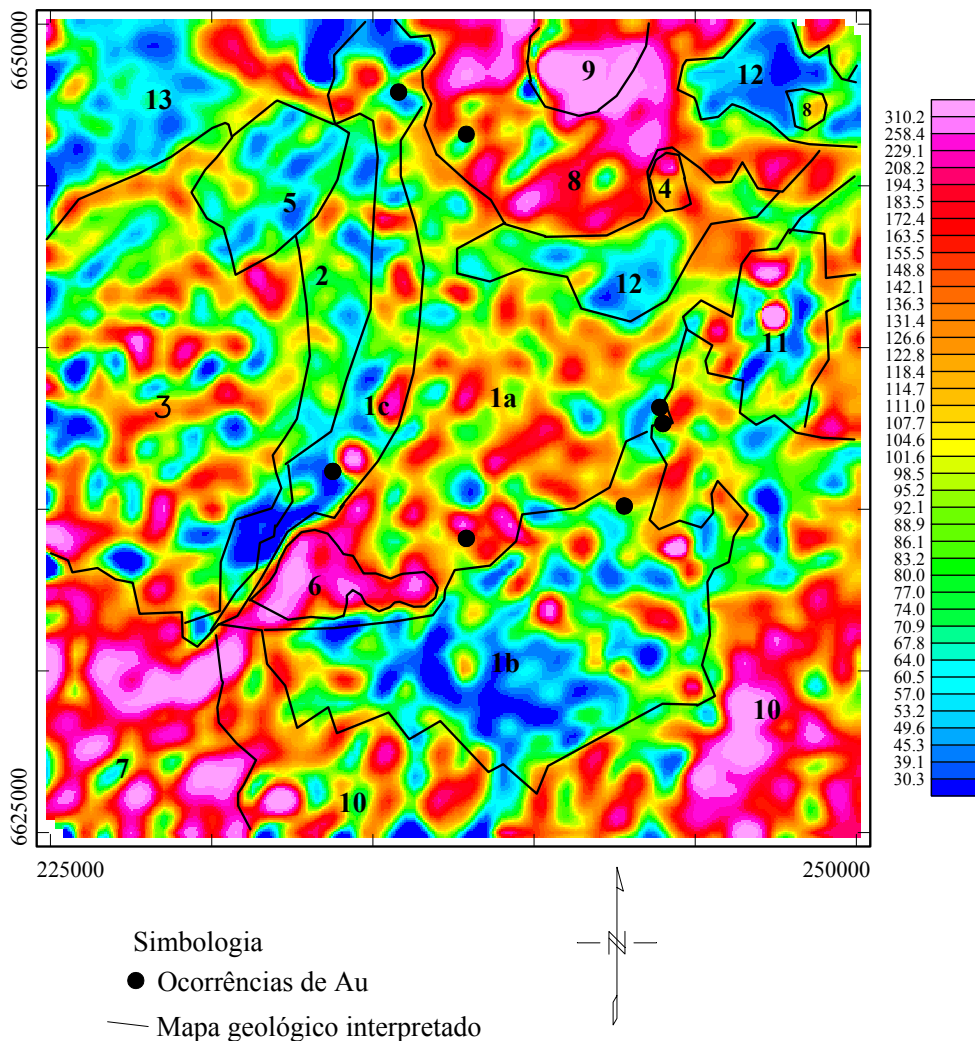


Figura 5.12. Mapa do Parâmetro  $F$  da região do Complexo Bossoroca, mostrando que as ocorrências auríferas se encontram no limite entre variações anômalas baixas e altas, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Sequência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepê; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná.

## 5.5 Interpretação dos dados aeromagnéticos

### 5.5.1 Campo magnético anômalo

Foram extraídos lineamentos do campo magnético total anômalo representativo de diferentes comprimentos de onda e de diferentes frequências, com a finalidade de rastrear as principais estruturas de diferentes profundidades, desde as mais profundas até as mais superficiais, por meio das características ferromagnéticas, tais como:

- Corpos magnéticos;
- Material de preenchimento (falhas e condutos);
- Perda de material magnético;

Essas frequências foram separadas com filtros como o de primeira e segunda derivadas vertical e gradiente horizontal (E-W e N-S) para salientar os lineamentos com altas frequências e conseqüentemente, mais superficiais. Filtros como continuação para cima (1km), integral vertical e sinal analítico, foram utilizados para salientar os lineamentos e corpos magnéticos com baixas frequências que representam fontes mais profundas.

De um modo geral, as anomalias com as amplitudes mais altas, encontram-se nas regiões do Complexo Cambaí, a oeste da área de trabalho, parte da Seqüência Arroio Lajeado, no limite entre a Seqüência Campestre e as vulcânicas da Bacia do Camaquã, anomalias associadas ao Complexo Pedras Pretas e ao Granito Rincão dos Coqueiros, e na parte sul, algumas anomalias associadas aos falhamentos.

Em relação às características magnéticas das litologias do Complexo Bossoroça podemos verificar através da Figura 5.13 que o relevo dos granitóides e rochas metassedimentares derivadas de rochas ácidas e metavulcânicas intermediárias à ácidas é bastante suave e de baixa amplitude. Já as unidades compostas por rochas vulcânicas máficas e ultramáficas, metassedimentares químicas ricas em óxidos de Fe e metassedimentos derivadas desse tipo, possuem um relevo mais acidentado com altas frequências.

A Figura 5.13 mostra um mapa interpretativo para os lineamentos do Complexo Bossoroça salientando um sistema de falhamentos em todas as direções e com as mais variadas profundidades.

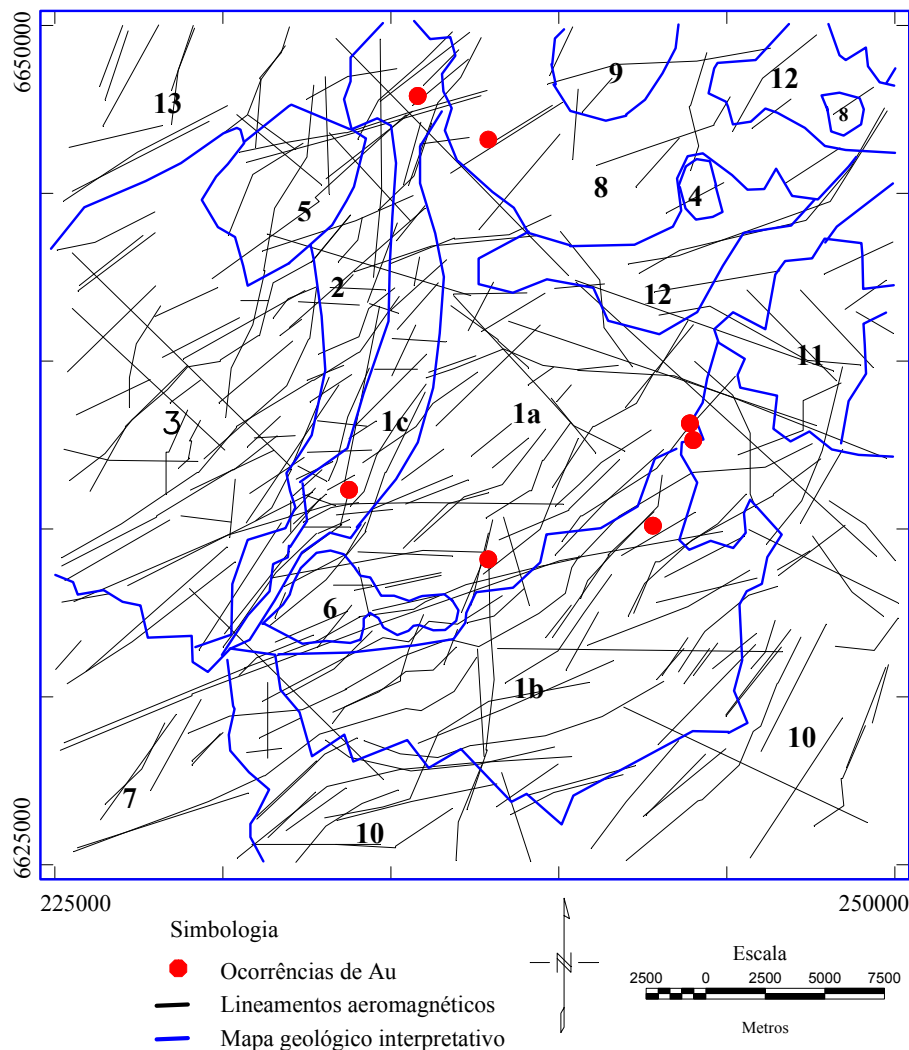


Figura 5.13. Mapa dos principais lineamentos do campo magnético anômalo da região do Complexo Bossoroça, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Sequência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná.

Os lineamentos mapeados do campo magnético anômalo possuem uma estruturação principal NE-SW, que coincide com as principais falhas mapeadas, ou zonas de cisalhamento do mapa geológico. Esse sistema de falhamentos NE-SW possui mesma amplitude e frequência, mas de diferentes comprimentos. Podemos observar quatro conjuntos distintos:

- Um sistema de lineamentos ao sul das ocorrências auríferas, dentre os lineamentos, pode-se identificar a falha Cerrito do Ouro de direção NE-SW e um conjunto de falhas que podem estar interconectadas e que possuem a mesma direção;

- Um lineamento de mesma amplitude idêntica à falha Cerrito do Ouro de direção NE-SW cortando a Mina Bossoroca, porém poderá estar deslocando um outro lineamento de direção NNE-SSW de menor amplitude;
- Um conjunto de lineamentos ao norte da Mina Bossoroca e ao sul das minas Passo da Juliana e Estuque de mesma direção e amplitude que a falha Cerrito do Ouro, da mesma forma que o lineamento presente na Mina Bossoroca, cortando os lineamentos de direção NNE-SSW;
- Um sistema de lineamentos ao norte próximo às ocorrências Passo da Juliana e Estuque com a mesma direção e amplitude da falha Cerrito do Ouro.

### **5.5.2 Primeira e segunda derivadas verticais**

A análise das imagens sombreadas e tons de cinza dos mapas de primeira e segunda derivada vertical reduzidas ao pólo das Figuras 5.14 e 5.15, permitiu a identificação de padrões lineares fortemente orientados na direção NE-SW, NW-SE, E-W e secundariamente N-S. Esses conjuntos de lineamentos estão fortemente associados às principais zonas de cisalhamento, falhas e fraturas da região do Complexo Bossoroca, bem como aos diques básicos e intermediários, principalmente na direção NW-SE.

Um detalhe importante a ser destacado é que no mapa de lineamentos da primeira derivada vertical reduzida ao pólo, mostra que as ocorrências Mina Bossoroca e Guardinha estão associadas a um sistema de falhamentos de direção NE-SW, e a um conjunto de lineamentos de direção N-S que pode ter sido afetado por falhamentos de direções NW-SE ou E-W. Pequenos lineamentos afetam as ocorrências auríferas tanto nas direções NE-SW e NW-SE, sendo que esta pode estar marcando a presença de veios de fratura de cisalhamento oblíquo, como é o caso da Mina Cerrito do Ouro, onde está sitiada numa fratura do tipo Anti-Ridel desenvolvidos durante fases de deformação dúctil-rúptil e rúptil, sob condições de cisalhamentos simples (Viter 1997).

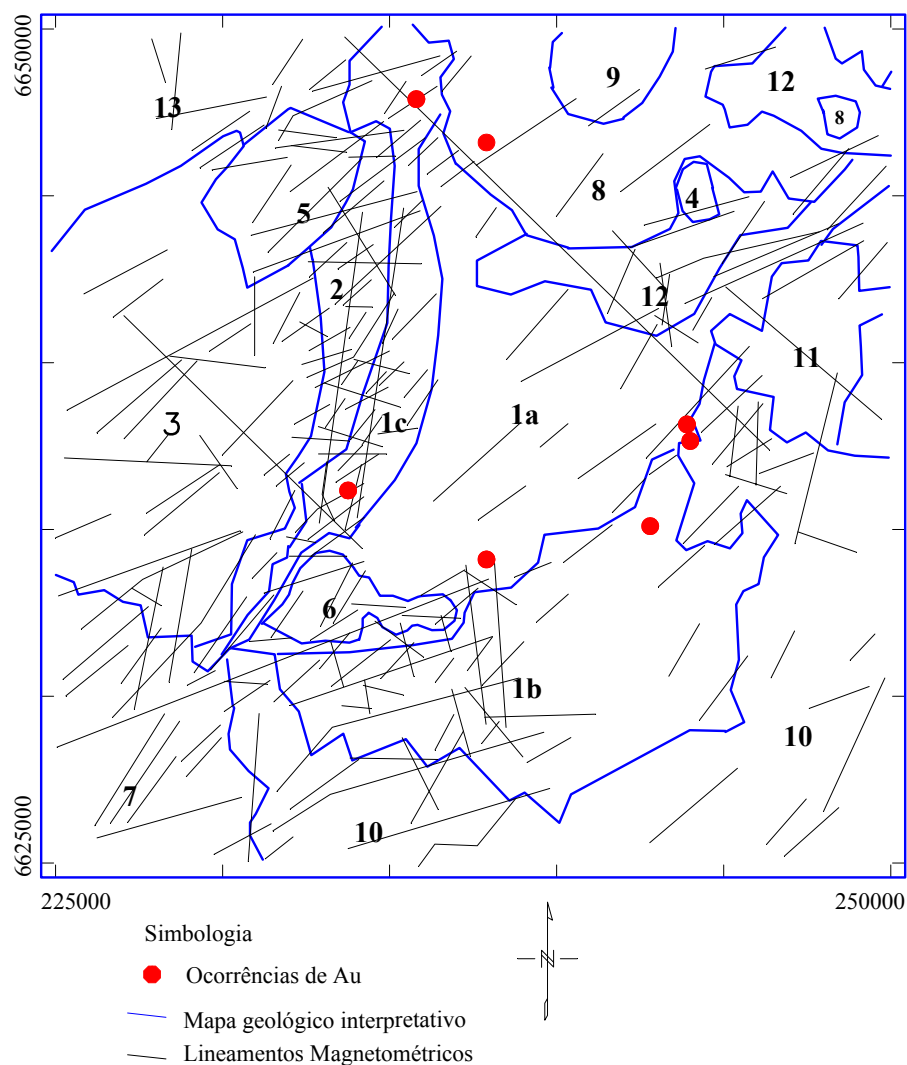


Figura 5.14. Mapa dos principais lineamentos da imagem de primeira derivada vertical do campo magnético anômalo da região do Complexo Bossoroca, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Seqüência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná.



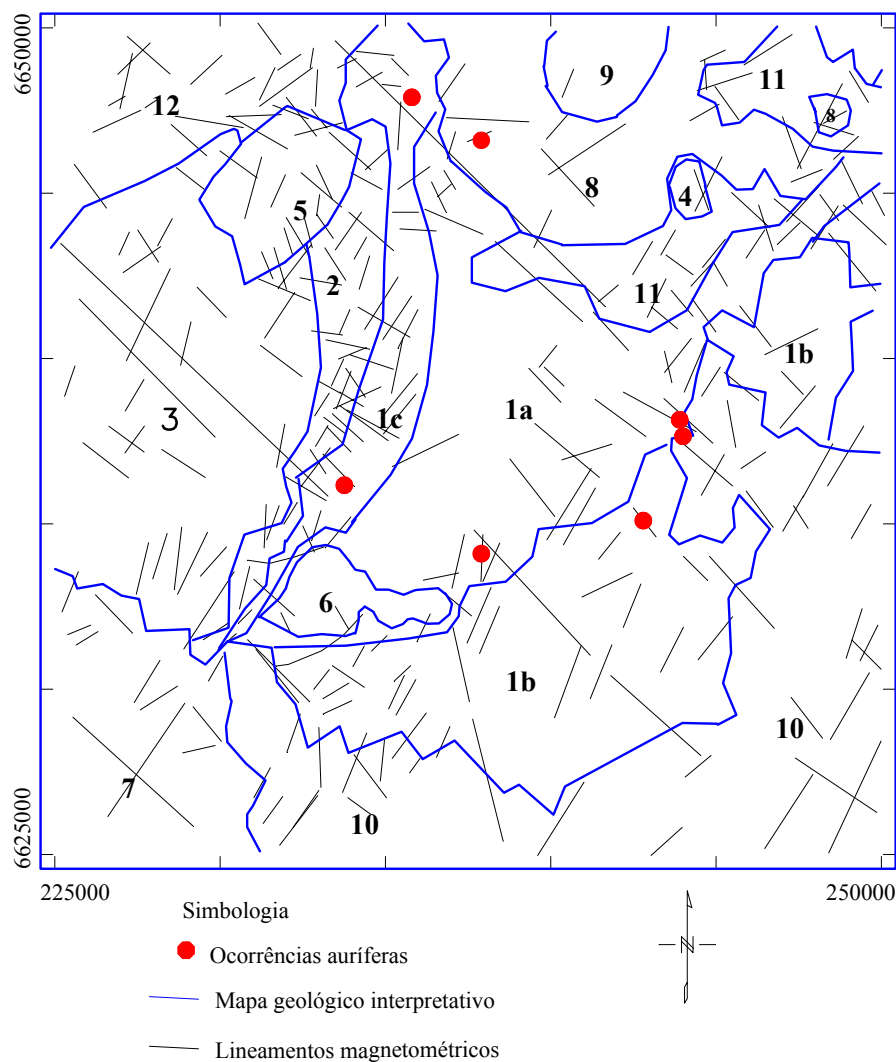


Figura 5.15. Mapa dos principais lineamentos da imagem da segunda derivada vertical do campo magnético anômalo da região do Complexo Bossoroca, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Seqüência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná.

### 5.5.3 Gradiente horizontal

O mapa do gradiente horizontal N-S em tons de cinza com relevo sombreado a 45° (Figura 5.16) revela um forte padrão de lineamentos com direções NW-SE. A Figura 5.17 mostra esses lineamentos com as principais unidades interpretadas dos mapas ternários. Esses

lineamentos podem estar associados a falhamentos de direção NW-SE e podem estar correlacionados diretamente com as ocorrências auríferas.

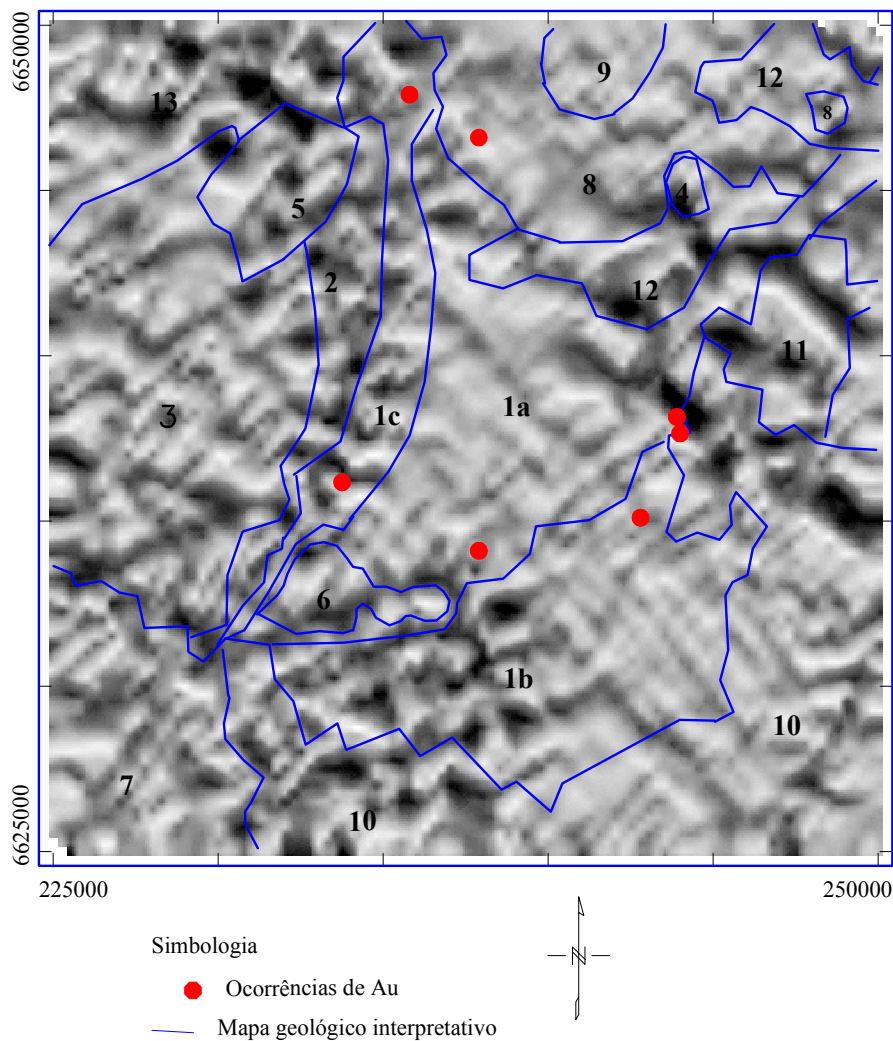


Figura 5.16. Mapa com relevo sombreado a 45° pseudocolorido em tons de cinza do gradiente horizontal na direção N-S, extraído derivada horizontal “y” da região do Complexo Bossoroca, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Seqüência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná.

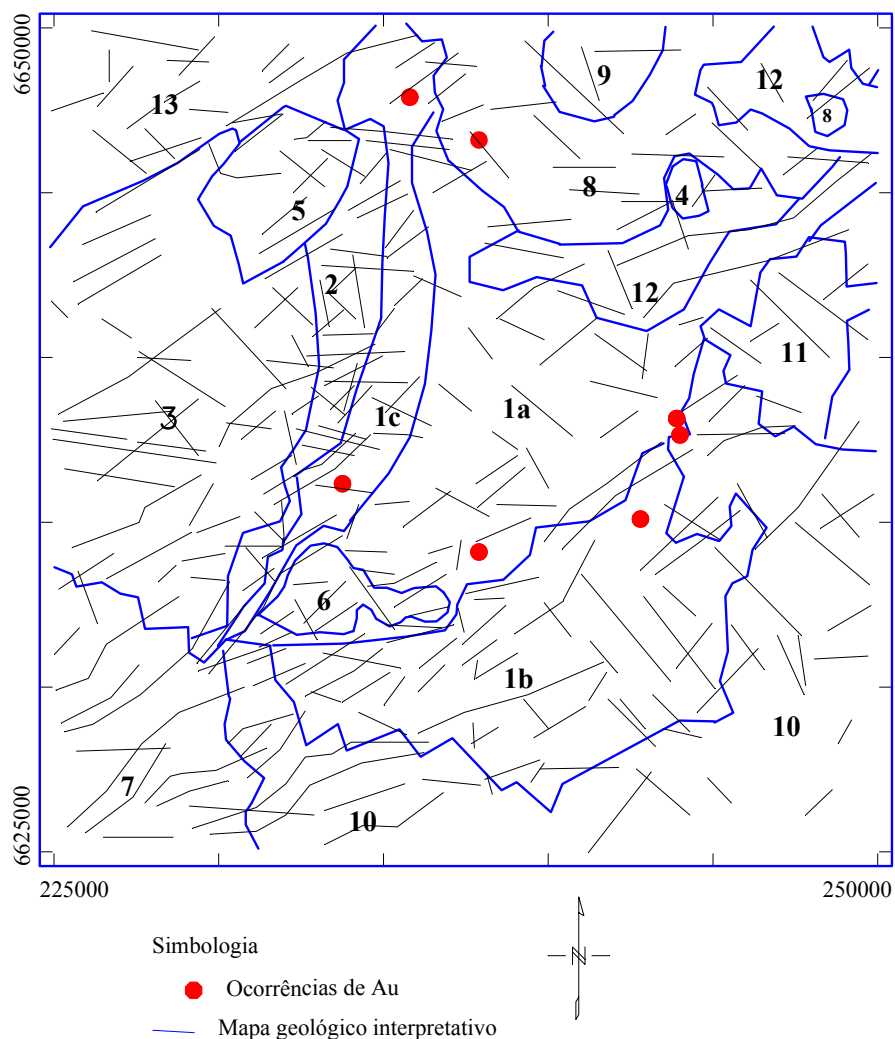


Figura 5.17. Mapa dos principais lineamentos extraídos da imagem anterior, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Seqüência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná.

#### 5.5.4 Continuação para cima

Os mapas de continuação para cima são considerados filtros do tipo passa-baixa, pois removem ou minimizam os efeitos de fontes rasas e ruídos (Geosoft, 1999). Os principais lineamentos extraídos dos mapas de continuação para cima, 1000, 2000 e 3000 metros da região do Complexo Bossoroca estão disponíveis nas Figuras 5.18, 5.19 e 5.20 respectivamente, associados ao mapa interpretativo de unidades aerogamaespectrométricas.

Os principais lineamentos encontram-se nas direções NE-SW e NW-SE, indicando geralmente contatos geológicos.

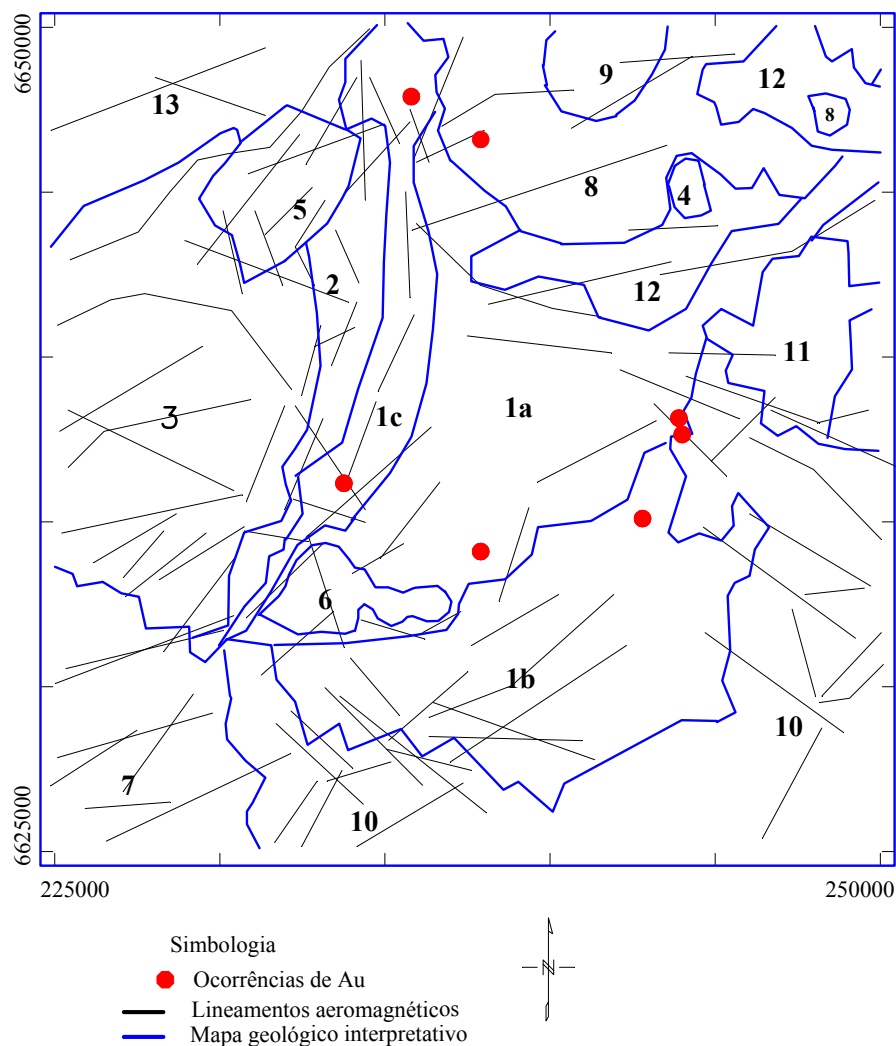


Figura 5.18. Mapa dos principais lineamentos extraídos da imagem continuação para cima (1000 metros) do campo magnético anômalo da região do Complexo Bossorooca, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Sequência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná.

### 5.5.5 Sinal analítico

A Figura 5.21 representa as amplitudes do sinal analítico da integral vertical da região do Complexo Bossoroca associado ao mapa interpretativo das unidades gamaespectrométricas e a Figura 5.22 os principais lineamentos extraídos da imagem do sinal analítico estão direcionados a NE-SW e NW-SE. Baixos valores, principalmente encontrados nos granitos tardi a pós-orogênicos, podem estar indicando mudanças químicas e regiões de altas amplitudes, como nos limites entre as unidades 1c e 2, a concentração de rochas máficas e ultramáficas. Na região de domínio 2 podemos verificar a presença de altas amplitudes, podendo indicar a presença de alto conteúdo de minerais magnéticos, caracterizando as unidades máficas ultramáficas da Seqüência Arroio Lajeado. Altas amplitudes associadas aos lineamentos podem indicar a precipitação de minerais ao longo do plano de falha e linhas associadas a baixas amplitudes podem relacionar-se a oxidação de minerais magnéticos para minerais não magnéticos ao longo de planos de falha ou zonas de cisalhamento.

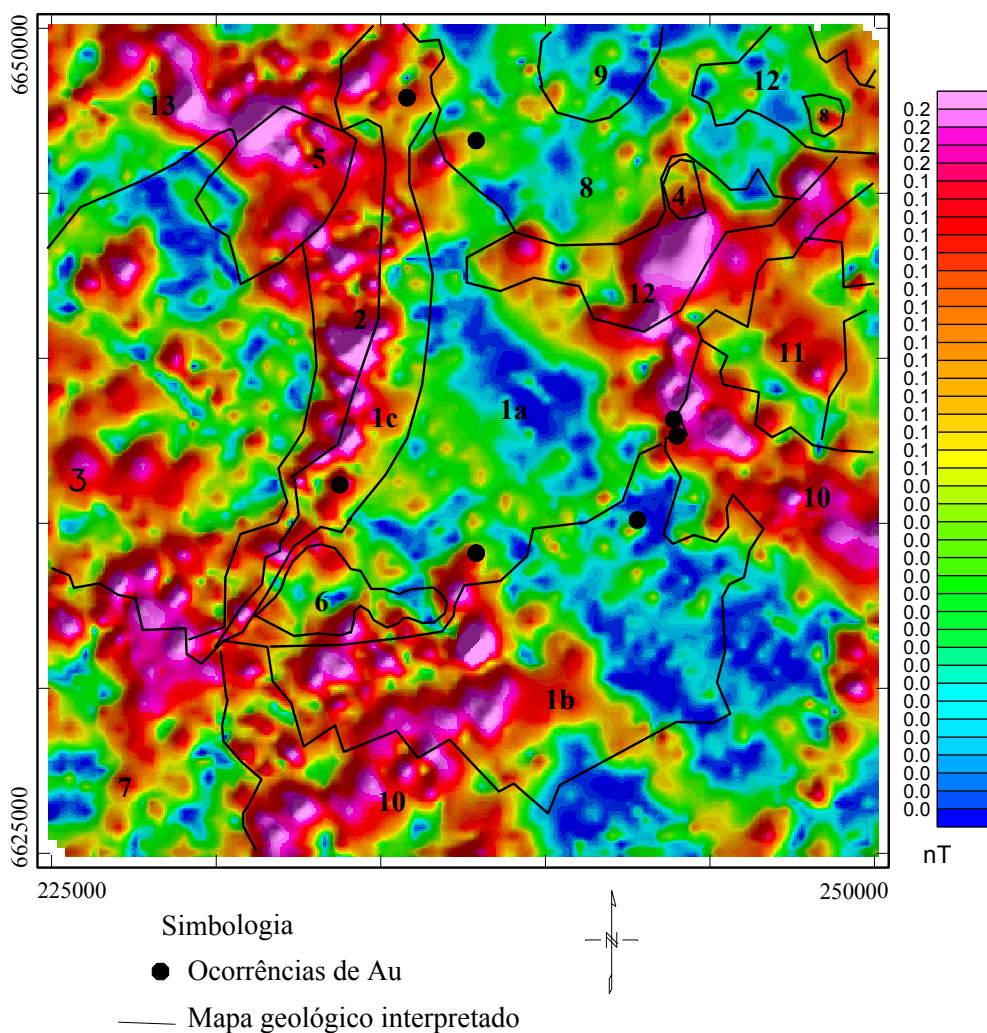


Figura 5.19. Mapa de amplitude do sinal analítico do campo magnético anômalo da região do Complexo Bossoroça, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Sequência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná.

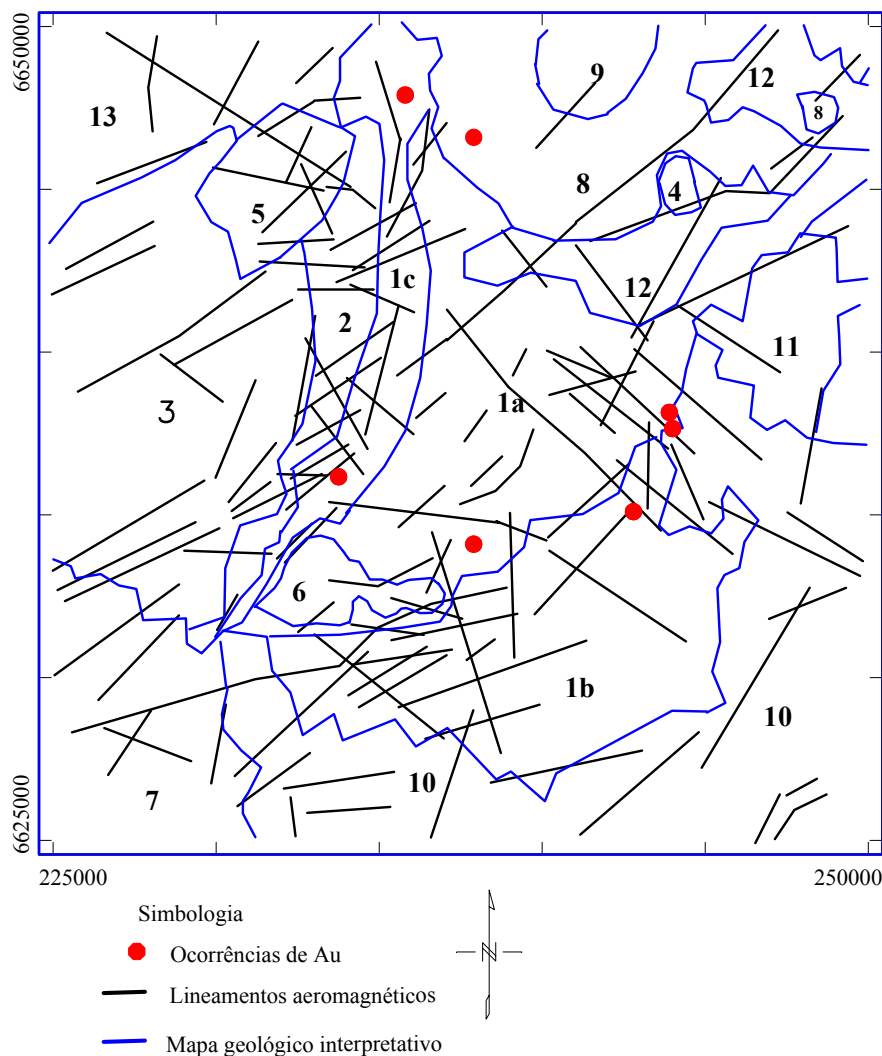


Figura 5.20. Mapa dos principais lineamentos extraídos da imagem anterior, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Sequência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná.

A Figura 5.23 representa os principais lineamentos das altas frequências magnéticas da região do Complexo Bossoroça. Pode-se considerar os seguintes aspectos:

- Uma forte associação dos lineamentos nas direções preferenciais NE-SW, NW-SE e secundariamente N-S e E-W;

- Lineamentos magnéticos associados a sistemas de falhamentos nas direções preferenciais NE-SW e NW-SE na região do Complexo Bossoroca;
- Litologias máficas-ultramáficas, como, por exemplo, a região da Sequência Arroio Lajeado, possui as maiores quantidades de lineamentos magnéticos, pois este tipo de litologia apresenta o maior conteúdo de minerais magnéticos;
- Lineamentos nas direções NE-SW e NW-SE podem constituir importantes zonas de dilatação ou de remobilização de metais, merecendo uma atenção especial na prospecção mineral da região.

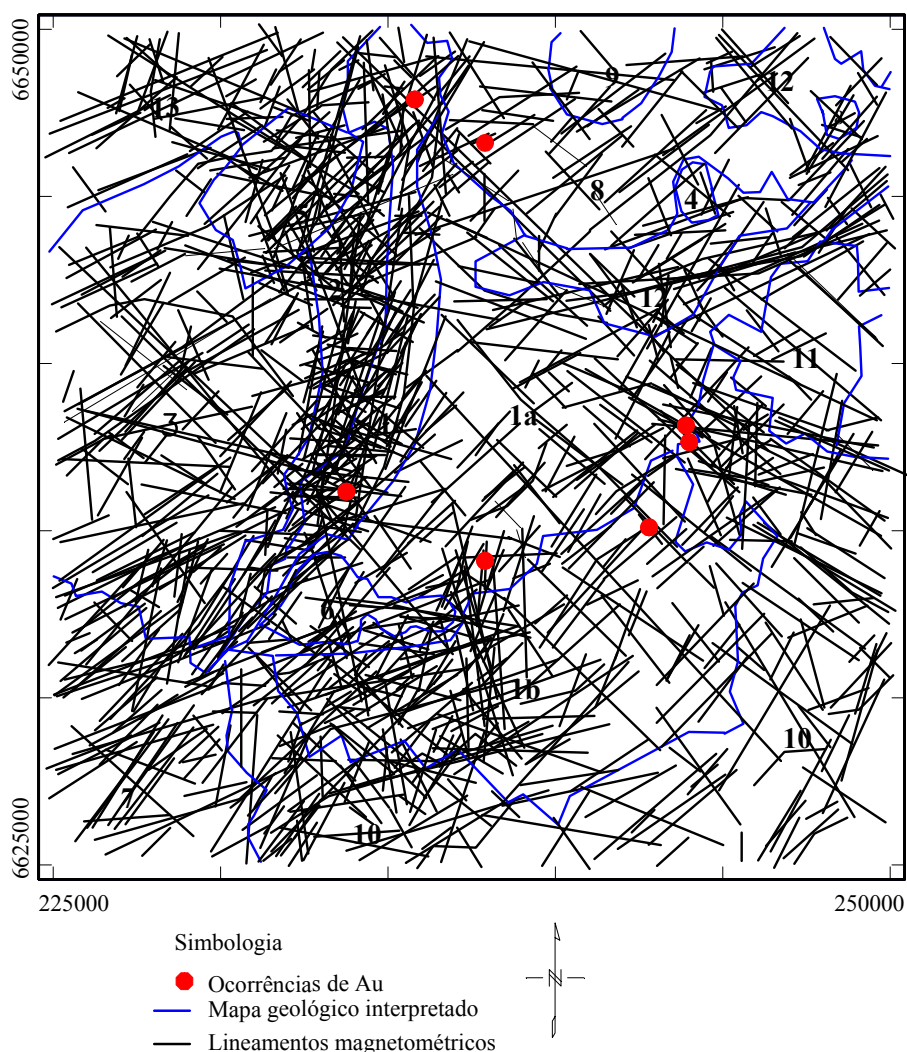


Figura 5.21. Mapa qualitativo e interpretativo dos principais lineamentos superficiais magnetométricos da região do Complexo Bossoroca, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Sequência Arroio Lajeado; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná.

Os lineamentos extraídos dos canais de contagem total, potássio, urânio e tório foram colocados num único mapa (Figura 5.24). Podemos observar os seguintes aspectos:

- As ocorrências auríferas estão associadas a lineamentos preferenciais de direções NW-SE, NE-SW;
- No contexto geral, os lineamentos aeroaerogamaespectrométricos estão associados aos principais falhamentos regionais (por exemplo, falha Cerrito do Ouro); à grandes discontinuidades que marcam contatos litológicos, como por exemplo, no limite entre as litologias do Complexo Cambaí e as litologias da Bacia do Paraná.

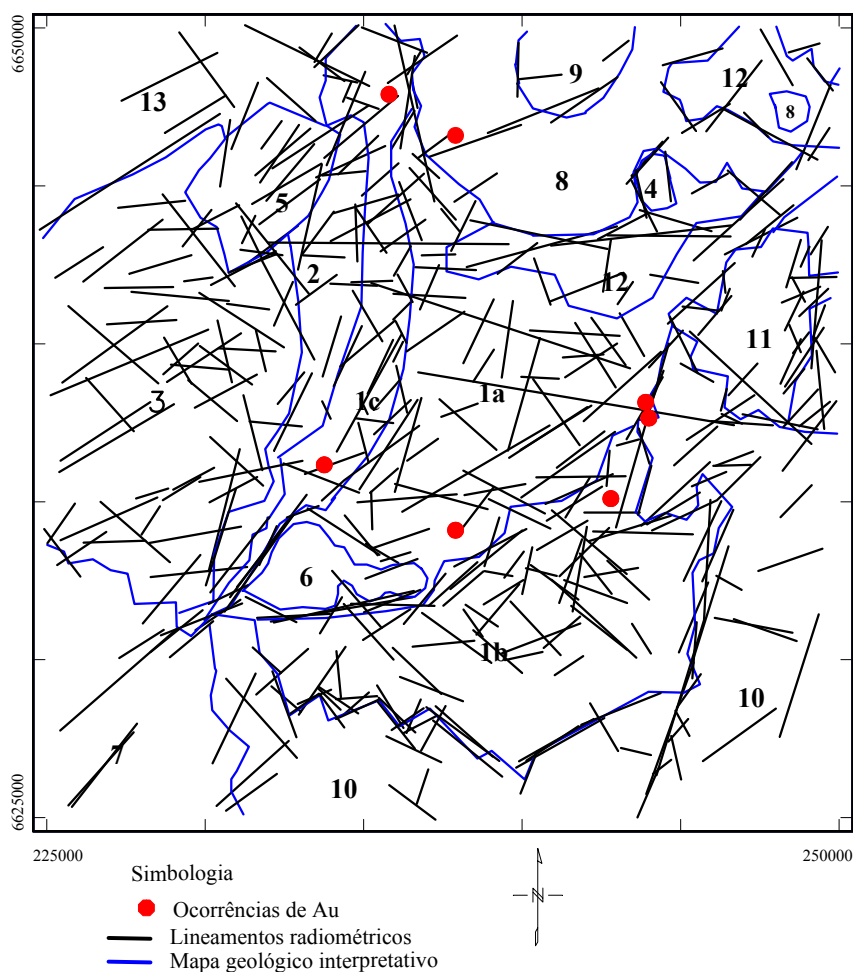


Figura 5.22. Mapa qualitativo e interpretativo dos principais lineamentos aerogamaespectrométricos da região do Complexo Bossoroca, associado às principais assinaturas geológicas gamaespectrométricas, onde 1 a, 1b e 1c corresponde a Formação Campestre; 2 Sequência Arroio Lajeadinho; 3 Complexo Cambaí; 4 Complexo Pedras Pretas; 5 Gabro Mata Grande; 6 Granito Cerro da Cria; 7 Granito Ramada; 8 Granito São Sepé; 9 Granito Rincão dos Coqueiros; 10 Coberturas sedimentares e vulcanossedimentares da Bacia do Camaquã; 11 Formação Passo Feio; 12 e 13 Sedimentos de cobertura da Bacia do Paraná.



# Capítulo 6

## Conclusões e Recomendações

De acordo com os resultados mostrados nos capítulos anteriores podemos traçar algumas considerações finais relatadas neste trabalho. A seguir são apresentados os aspectos mais relevantes a respeito dos resultados atingidos nessa dissertação:

- O processamento de dados aerogamaespectrométricos possibilitou a caracterização de unidades geológicas regionais, a identificação de possíveis *trends* e zonas anômalas em potássio, relacionadas com as principais ocorrências auríferas da região;
- A técnica de processamento de dados aerogeofísicos aerogamaespectrométricos mostrou-se de grande utilidade para o mapeamento geológico. As imagens ternárias nos padrões RGB e CMY permitiram a distinção e a caracterização das grandes unidades geológicas;
- Pode-se individualizar três regiões principais dentro da Seqüência Campestre, onde se encontram as ocorrências auríferas;
- O domínio 1a, com teores de potássio, tório e urânio baixos a altos, caracterizados por rochas vulcânicas intermediárias a ácidas; o domínio 1b, com teores muito baixo a baixo caracterizados por litologias máficas a ultramáficas e a região 1c, no limite entre a Seqüência Campestre e a Seqüência Arroio Lajeadinho, com teores muito baixos a médios caracterizados por litologias básicas a intermediárias;
- As imagens magnetométricas mostraram-se importante na caracterização estrutural regional, possibilitando a identificação de lineamentos de primeira e segunda ordem

que podem estar relacionados diretamente às ocorrências auríferas da região do Complexo Bossoroca;

- A aplicação das técnicas de processamento e interpretação de estruturas magnéticas através dos filtros como gradiente horizontal, primeira e segunda derivada, sinal analítico, continuação para cima, possibilitaram a determinação de descontinuidades físicas que podem ser traduzidas em estruturas geológicas.

Podem ser destacados guias prospectivos para a região do Complexo Bossoroca nos seguintes aspectos:

- Aerogamaespectrométricos
  1. As ocorrências auríferas estão associadas aos teores baixos de contagem total, K, eTh e eU que podem indicar contribuições primárias correspondentes as litologias máficas-ultramáficas da região do Complexo Bossoroca. Teores altos nas imagens de Kd (potássio anômalo) e parâmetro  $F$  (potássio hidrotermal), podem estar associados a alterações hidrotermais, principalmente nas seqüências Arroio Lajeado e Campestre.
  2. Lineamentos extraídos das imagens aerogamaespectrométricas podem indicar as principais zonas de falha, fraturas, zonas de cisalhamento e limites litológicos. Os lineamentos extraídos da imagem de K e eTh podem indicar falhas ou zonas de cisalhamento por onde o potássio pode ter sido remobilizado e condutos para os fluidos mineralizantes.
  3. Os teores elevados de urânio na região do Complexo Bossoroca podem estar associados às rochas sedimentares químicas do tipo formações ferríferas, onde foram encontradas partículas de ouro.
  4. No mapa do parâmetro  $F$ , existem importantes informações nas “quebras” de relevo radiométrico. Isto é muito importante, pois pode ser indicativo de mineralização.
- Aeromagnéticos
  1. O cruzamento dos principais lineamentos magnéticos nas direções NW-SE e NE-SW como visto nos mapas de primeira e segunda derivada vertical, gradiente horizontal, sinal analítico e integral vertical. Lineamentos nas direções NE-SW e NW-SE podem constituir importantes zonas de dilatação ou de remobilização de metais, merecendo uma atenção especial na prospecção mineral da região.

É necessário o aprimoramento de detalhes geofísicos em áreas onde há ocorrências auríferas no Escudo Sul-rio-grandense, tais como:

- Estudos gravimétricos de semidetalhe nas regiões com litologias máficas ultramáficas, principalmente no limite entre as Seqüências Arroio Lajeado e a Seqüência Campestre com o objetivo de caracterizar a região quanto às suas propriedades físicas e de profundidade;
- Realização de pesquisas aeromagnetométricas de alta resolução para caracterização e separação das principais unidades magnéticas dentro das seqüências máficas e ultramáficas da Seqüência Arroio Lajeado bem como das vulcânicas da Seqüência Campestre;
- Estudos mais detalhados com amplitude do sinal analítico de segunda ordem e segunda ordem terraceada para caracterização magnética do campo anômalo em regiões onde há ocorrências auríferas;
- Aplicar aos dados aerogamaespectrométricos a metodologia do potássio anômalo em âmbito local e caracterizar estatisticamente cada área delimitada pelos domínios aerogamaespectrométricos, pois a técnica permite a discriminação de áreas hidrotermalmente alteradas dentro de cada unidade;
- Aplicação de técnicas eletromagnéticas na região do Complexo Bossoroca, pois esta técnica informa sobre os diferentes tipos de saprólitos e, por conseguinte, os principais litotipos que se originaram, por meio de suas condutâncias e condutividades. Esse método também é utilizado para se obter conhecimentos de profundidades com aproximadamente 300 metros ou mais, dependendo da topografia, ambiente resistivo, boas razões sinal/ruído e manto de alteração.

## Referências Bibliográficas

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. O Pré-Cambriano do Brasil. São Paulo, E. Blücher, 1984, 374 p.

ARYA, A. P. Fundamentals of Nuclear Physics. Boston: Allyn and Bacon Inc, 1966.

BABINSKI, M; CHEMALE, F.; HARTMANN, L. A.; VAN SCHMUS, W. R.; SILVA, L. C. da, Juvenile accretion at 750-700 Ma in Southern Brazil. Geology, v. 24, n. 5, p. 439-442, 1996.

BENNET, R. Exploration for hydrothermal mineralization with airborne gamma-ray spectrometry. In: Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Geoch. Explor. Symp., Toronto, Can. Inst. Min. Metall. Spec. v. 11, p. 475-478. April 16-18, 1971.

BHATTACHARYYA, B.K. Continuous spectrum of the total magnetic field anomaly due to a rectangular prismatic body. Geophysics, v. 31, p. 97 – 212, 1966.

BILLINGS, S. D.; RICHARDS, D. Quality control of malha regularized aeromagnetic data. Exploration Geophysics, v. 31, p. 212-217, 2000.

BLUM, M. L. B. Processamento e interpretação de dados de geofísica aérea no Brasil Central e sua aplicação à geologia regional e à prospecção mineral. Brasília, 1999. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 113 p.

BOYD, D.M. Aeromagnetic surveys and gold, In: Doyle, Geophysical exploration for Precambrian gold deposits. University of Western Australia, 1984, , p. 81-96, Publication No. 10.

BOYLE, R. W. Geochemical prospecting for thorium and uranium deposits. Developments in Economic Geology, n. 16 p. 71-78, 1982.

BRIGGS, I. C. Machine contouring using minimum curvature. Geophysics, v.39, p 39-48, 1974.

CARVALHO, M. T. N. Integração de dados geológicos, geofísicos e geoquímicos aplicada à prospecção de ouro nos Greenstones Belts de Pilar de Goiás e Guarinos, GO. Brasília, 1999. Tese de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 190p.

CHEMALE Jr., F., Evolução geológica do Escudo Sul-rio-grandense. In: Geologia do Rio Grande do Sul, UFRGS, 2000, p. 13-52.

CHURCH, B. N.; PETTIPAS, A. R. Interpretation of second derivative aeromagnetic maps at the Silver Queen and Equity Silver mines, Houston, B. C. CIM Bulletin, v. 83, n. 934, p 69-76, 1990.

CLARK, R. N.; GALLAGHER, A. J.; SWAYZER G. A. Material absorption band depth mapping of imaging spectrometer data using a complete band shape least-squares fit with library reference spectra. In: Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop. Proceedings... 90-54, 1990, p. 176-186.

CONRAD, G.; COUCH, R.; GEMPERLE, M. Analysis of aeromagnetic measurements from the Cascade Range in Central Oregon. Geophysics, vol. 48, n. 3, p. 376 – 390, 1983.

COSTA, A. F. U. Teste e modelagem geofísica da estruturação das associações litotectônicas Pré-Cambrianas no Escudo Sul-rio-grandense. Porto Alegre,. Instituto de Geociências, Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1997, v.1, 179p.

CROSTA, A. P.; MOORE, J. M. Enhancement of landsat thematic mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State, Brazil; a prospecting case history in greenstone belt terrain. In: Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology; methods, integration, solutions, 1989, n.7 p. 1173-1187. Proceedings of the Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology.

De BON, F.; LE FORT, P. Chemical-mineralogical classification of plutonic rocks and associations-examples from southern Asia belts. In: Geology of granites and their metallogenic relations, p. 293-311, 1982.

DAVIS, J. D.; GUILBERT, J. M. Distribution of the radioelements potassium, uranium and thorium in selected porphyry copper deposits. Economic Geology, v. 68 n. 2, p. 145-160, Mar-Apr. 1973.

DICKSON, B. L.; SCOTT, K. M. Interpretation of aerial gamma ray surveys – adding the geochemical factors. AGSO Journal of Australian Geology ; Geophysics, Australia, v. 17, n. 2, p. 187 – 200, 1997.

DOBRIN, M. B.; SAVIT, C. H. Introduction to geophysical prospecting. 4 ed., McGraw – Hill, 1988, p. 633 – 749.

FUCK, R., F. Interpretação de dados magnetométricos, eletromagnetométricos e aerogamaespectrométricos da região central da Serra do Carajás, PA. Brasília, 2000. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 185p.

GASTAL, M. C.; LAFON, J. M. Gênese e evolução dos granitóides metaluminosos de afinidade alcalina da porção oeste do Escudo Sul-rio-grandense: geoquímica e isótopos de Rb-Sr e Pb-Pb. Revista Brasileira de Geociências, v. 28, n. 1, p. 11-28, 1998.

GEOSOFT. Oasis Montaj 4.3. GEOSOFT, INC., Toronto. 1999.

GRANT, F. S. Aeromagnetic, geology, and ore environments: II Magnetite and ore environments. Geoexploration, v. 24, p. 335-362, 1984.

GRANT, F. S.; DODDS, J. Magmapp FFT processing system development notes, Paterson Grant and Watson, 1972.

HARTMANN, L. A.; REMUS, M. V. D. Origem e evolução das rochas ultramáficas do Rio Grande do Sul desde o Arqueano até o Cambriano. In: Geologia do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, UFRGS, 2000, p. 53-78.

HENDERSON, R. G.; ZIETZ, I. The upward continuation of anomalies in total magnetic intensity fields. Geophysics, vol. 14, p. 517 – 534, 1949.

HENDERSON, R. G.; ZIETZ, I. Computation of the second vertical derivatives of geomagnetic fields. Geophysics, v. 14, p. 508-516, 1949.

HENKEL, H.; GUZMAN, M. Magnetic features of fracture zones. Geoexploration, v. 15, p. 173-181, 1977.

HOLLAND, H. D. Granites, solutions, and base metal deposits. Economic Geology, v. 67, p. 281-301, 1972.

HONEY, F. R.; DANIELS, J. L. Application of Carr Boyd Minerals Limited Airborne Multispectral Scanner to Spectral Discrimination of Hydrothermally altered areas. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, Fourth Thematic Conference, Remote Sensing for Exploration Geology. Proceedings... v. 1, p. 227-231, 1985.

HOOVER, D. B., HERAN, W. D. ; Hill, P. L., 1992. The geophysical expression of selected mineral deposits. 129 p., 1992. US Geological Survey Open-File Report 92-557.

IRVINE, T. N.; BARRAGAR, W. R. A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Canadian Journal of Earth Sciences, n. 8, p. 523-548, 1971.

IRVINE, R. J. ; SMITH, M. J. Geophysical exploration for epithermal gold deposits. Journal of Geochemical Exploration, v. 26, p. 375-412, 1990.

ISLES, D.J.; HARMAN, P.G.; CUNNEEN, J.P. The contribution of high resolution aeromagnetic to archean gold exploration in the Kalgoorlie region, western Australia: The Geology of Gold Deposits. Economic Geology Monograph, v. 6, p. 389-397; 1989.

JACKSON, V. N.; RAMOS, V.A.; TERRY, S. A. ZUZEK, A. B. Projeto Aerogeofísico Camaquã, Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Texas Instruments, 1973, DNPM/CPRM/CNEN, 208p.

JENSEN, L.S.; PIKE, D.R. A new method of classifying subalkalic volcanic rocks. Misc. Pap. Ont. Div. Min., Ontário, 66, 22 p., 1976.

KAPLAN, I. Física Nuclear. In: Radioatividade natural e as leis da transformação radioativa. Rio de Janeiro: Guanabara, 1978, 194 p.

KOPPE, J. C. Metalogênese do ouro da Mina da Bossoroca, São Sepé, RS. Porto Alegre, 1990, Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, UFRGS, 289 p.

KUUSKRAA, V.; DECKER, D; LYNN, H. Optimizing Technologies for Detecting Natural Fractures in the Tight Sands of the Rulison Field, Piceance Basin (Pittsburgh, PA: National Energy Technology Laboratory), 29 p, 1996.

LINDEMAN, F. W. Geophysical case history of Water Tank Hill--Mt. Magnet, W.A. In: DOYLE, H.A. (ed.) Geophysical Exploration for Precambrian Gold Deposits. University of Western Australia, 1984, n. 10, p. 97-112,

LONGMAN, M. J. Location of gold deposits by digital processing of landsat data. In: DOYLE, H. A. (ed.) Geophysical Exploration for Precambrian Gold Deposits. University of Western Australia, 1984, n. 10, p. 65-80.

MACHADO, N.; KOPPE, J. C.; HARTMANN, L. A. A Late Proterozoic U-Pb age for the Bossoroca Belt, Rio Grande do Sul, Brazil. Journal of South American Earth Science, v. 3, n. 2/3, p. 87-90, 1990.



MACLEOD, I. N.; VIEIRA, S.; CHAVES, A. C. Analytic Signal and reduction-to-pole in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes. In: Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 3, 1993, Rio de Janeiro. Proceedings... p. 830 – 835.

MINTY, B. R.; LUYENDYK, A. P. J.; PRODIE, R. C. Fundamentals on airborne gamma-ray spectrometry. AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics, v. 17, n. 2, p. 39 – 50, 1997.

MOXHAM, R. M., FOOTE, R. S.; BUNKER, Gamma-ray spectrometer studies of hydrothermally altered rocks. Economic Geology, v.60, página 653-671, 1965.

NABIGHIAN, M. N. The analytic signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross – section: Its properties and use for automatic anomaly interpretation. Geophysics, v. 37, n. 3, p. 507 – 517, 1972.

NAIME, R. H. Geologia do Complexo Granítico Ramada e do Granito Cerro da Cria. Porto Alegre, 1987. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós Graduação em Geociências da UFRGS.

NETTLELTON, L. L. Elementary gravity and magnetic for geologists and seismologists. Tulsa, Okla.: Society of Exploration Geophysics, 1971, 121 p.

ORLANDI FILHO, V.; AZEVEDO, M. L. V.; COSTA, A. F. U.; RAMGRAB, O. E.; CAMOZZATO, E. Aerocintilometria aplicada ao mapeamento geológico da Folha Piratini (RS). Porto Alegre, Superintendência Regional de Porto Alegre, CPRM, 1990.

OSTROSVSKIY, E. Ya. Antagonism of radioactive elements in wallrock alterations fields and its use in aerogamma spectrometric prospecting. International Geology Review, 17, p. 461-468, 1975.

PARRO, P. S. Magnetometria e gamaespectrometria aerotransportadas na interpretação geológico-estrutural da região dos rios Juruena e Teles Pires, MT. Tese de Mestrado, Universidade de Brasília, DF, 1998, 105p.

PICHETTE, R. J. Application of aeromagnetic data to gold exploration in northeastern Ontario. CIM Bull. v. 75, n. 840, p. 61-65, 1982.

PIRES, A. C. B. Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. Revista Brasileira de Geociências, v. 25, n.1, p. 61-68, mar. de 1995.

PORCHER, C. A., Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Cachoeira do Sul. Folha 1:250.000. Estado do Rio Grande do Sul. CPRM, 2000. <http://www.cprm.gov.br/geo/csul.html>, acessado em 19 de Junho de 2001.

PORCHER, C. A.; LEITES, S. R.; RAMGRAB, G. E.; CAMOZZATO, E. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Passo do Salsinho. Folha SH. 22-Y-A-I-4. Estado do Rio Grande do Sul. CPRM, 1995, 339 p.

PRICHYSTAL, A.; GNOJEK, I. A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in northern Moravia (Czechoslovakia). Geoexploration, n. 23, p. 491-502, 1985.

REMUS, M. V. D. Metalogênese do cobre e evolução crustal da região de Caçapava do Sul, RS. Porto Alegre, 1998. Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, UFRGS.

ROLDÃO, D.G. Análise integrada de dados estruturais e geofísicos no controle de depósitos minerais na região oeste do Escudo Sul-rio-grandense (RS, Brasil). Porto Alegre, 2000. Dissertação de Mestrado – PPGEM/UFRGS 133p.

SHIVES, R.B.K., CHARBONNEAU, B.W., FORD, K.L. The detection of potassic alteration by gamma-ray spectrometry - recognition of alteration related to mineralization. In: Geophysics and Geochemistry at the Millenium, Proceedings of the Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration (Exploration 97), September, 1997. [http://www.gamma.gsc.nrcan.gc.ca/exp97\\_e.html/](http://www.gamma.gsc.nrcan.gc.ca/exp97_e.html/), acessado em 02 de Maio de 2000.

SMITH, W. H. F.; WESSEL, P. Grid regularizing with continuous curvature splines in tension. Geophysics, v. 55, p. 293-305, 1990.

SOLIANI JR. Os dados geocronológicos do Escudo Sul-rio-grandense e suas implicações de ordem geotectônica. São Paulo, 1986. Tese de Doutorado em Geociências pelo Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 425 p.

SOLIANI JR. E.; KOESTER; E; FERNANDES, L. A. D., A. Geologia isotópica do Escudo Sul-rio-grandense Parte II: os dados isotópicos e interpretações petrogenéticas. In: Geologia do Rio grande do Sul. Porto Alegre, UFRGS, 2000, p. 175-230.

SWAIN, C. J. A Fortran IV program for interpolating irregularly spaced data using the difference equations for minimum curvature. Computers and Geosciences, v.1, p 231-240, 1976.

VASCONCELLOS, R.M; METELO, M.J.; MOTTA, A.C.M.; GOMES, R.D. Geofísica em levantamentos geológicos no Brasil. Rio de Janeiro, CPRM, 1994. 165 p.

VITER, M. P. Contribuição ao estudo metalogenético dos principais depósitos auríferos da Sequência Campestre, RS. Porto Alegre, 1997. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós Graduação em Geociências da UFRGS, 97 p.

WHITAKER, A.; WELLMAN, P.; REITH, H. The use of gravity and magnetic surveys in mapping greenstone terrane near Kalgoorlie, western Australia. Exploration Geophysics, n. 4, p. 371-380, 1987.

WILDFORD, J.R.; BIERWIRTH, P.N.; CRAIG, M.A. Application of airborne gamma-ray spectrometry in soil/regolith mapping and applied geomorphology. Journal of Australian Geology & Geophysics, v. 2, n. 17, p. 201-216, 1997.

WILDNER, W. Caracterização geológica e geoquímica das seqüências ultramáficas e vulcanossedimentares da região da Bossoroca, RS. Porto Alegre, 1990 Tese de Mestrado do Curso de Pós -Graduação em Geociências da UFRGS, 170p.

ZARPELON, P. R. Geologia estrutural, estratigrafia e petrologia de uma parte do *greenstone belt* Cerrito do Ouro, município de São Sepé, RS. Porto Alegre, 1986. Tese de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geociências da UFRGS 215 p.